

LASER ET TRAITEMENT DES MATERIAUX

Détermination d'une épaisseur minimale
qu'un laser ablate dans un métal.

Plan

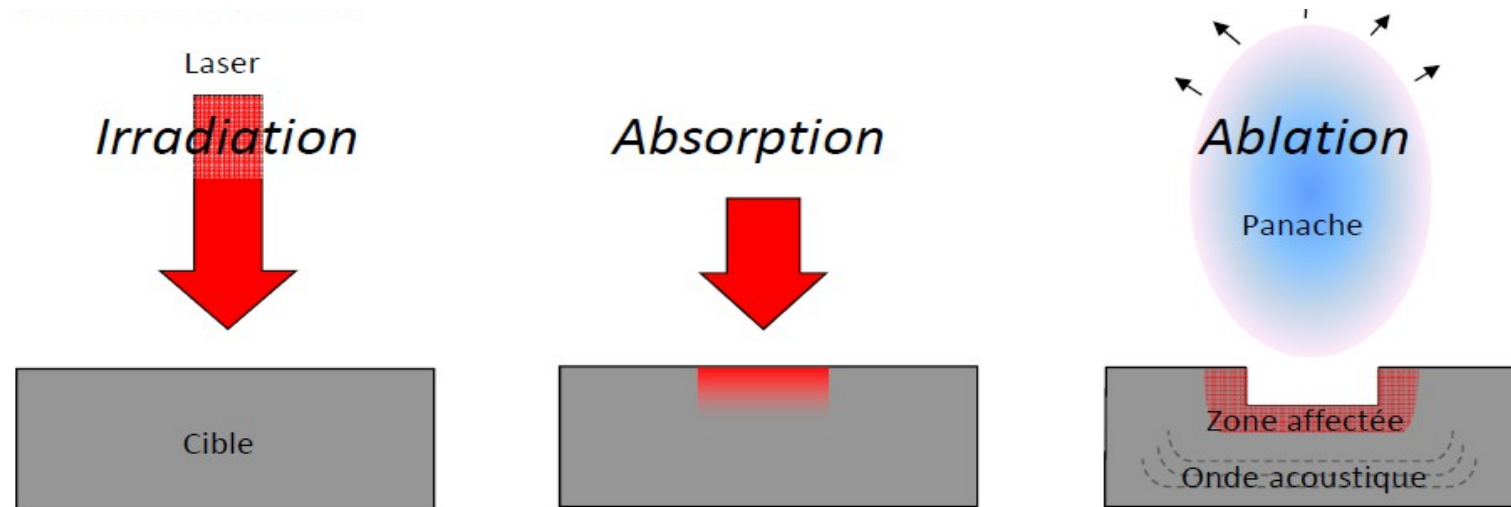
Introduction

I) Premier modèle : équation de la chaleur

II) Second modèle : puissance
électromagnétique apportée par le laser

III) Conclusion générale

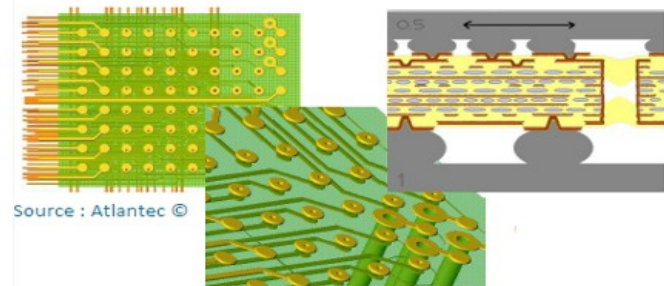
Introduction



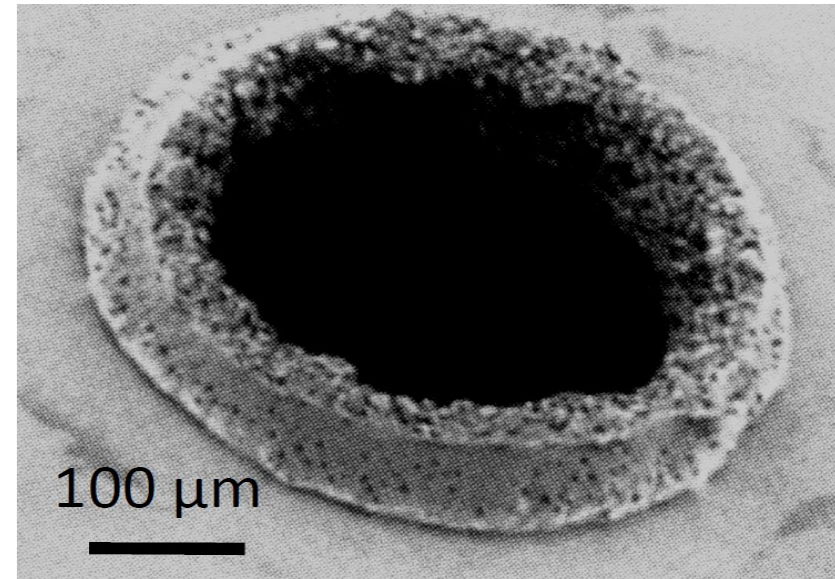
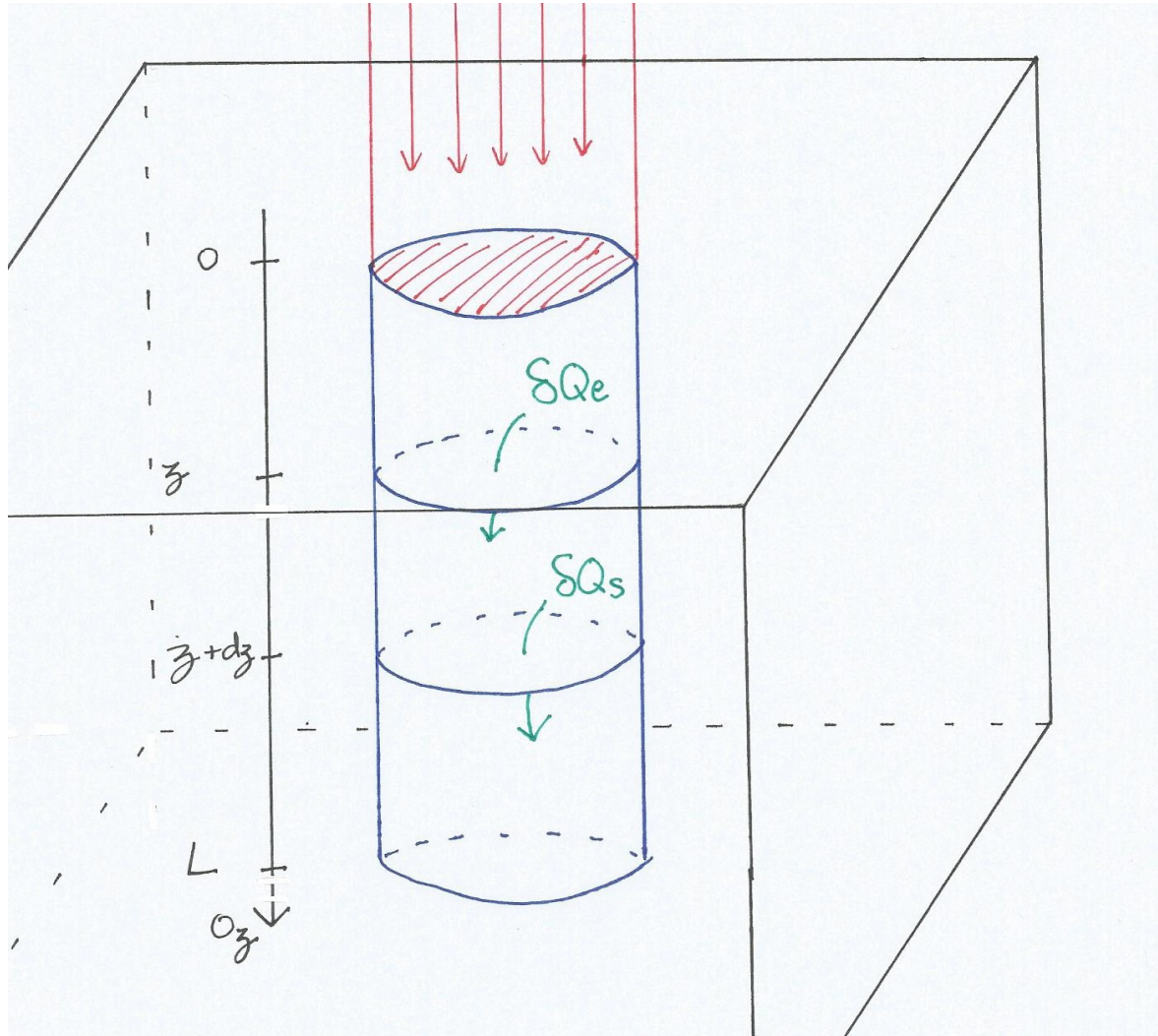
- Phénomène de décomposition spontanée de la matière

Ablation sélective par laser UV

Perçage de
vias en microélectronique



II) Premier modèle : équation de diffusion thermique



Processus thermique
(laser Yag)

Équation de diffusion thermique

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2}$$

$$K = \frac{\mu}{\rho c p}$$

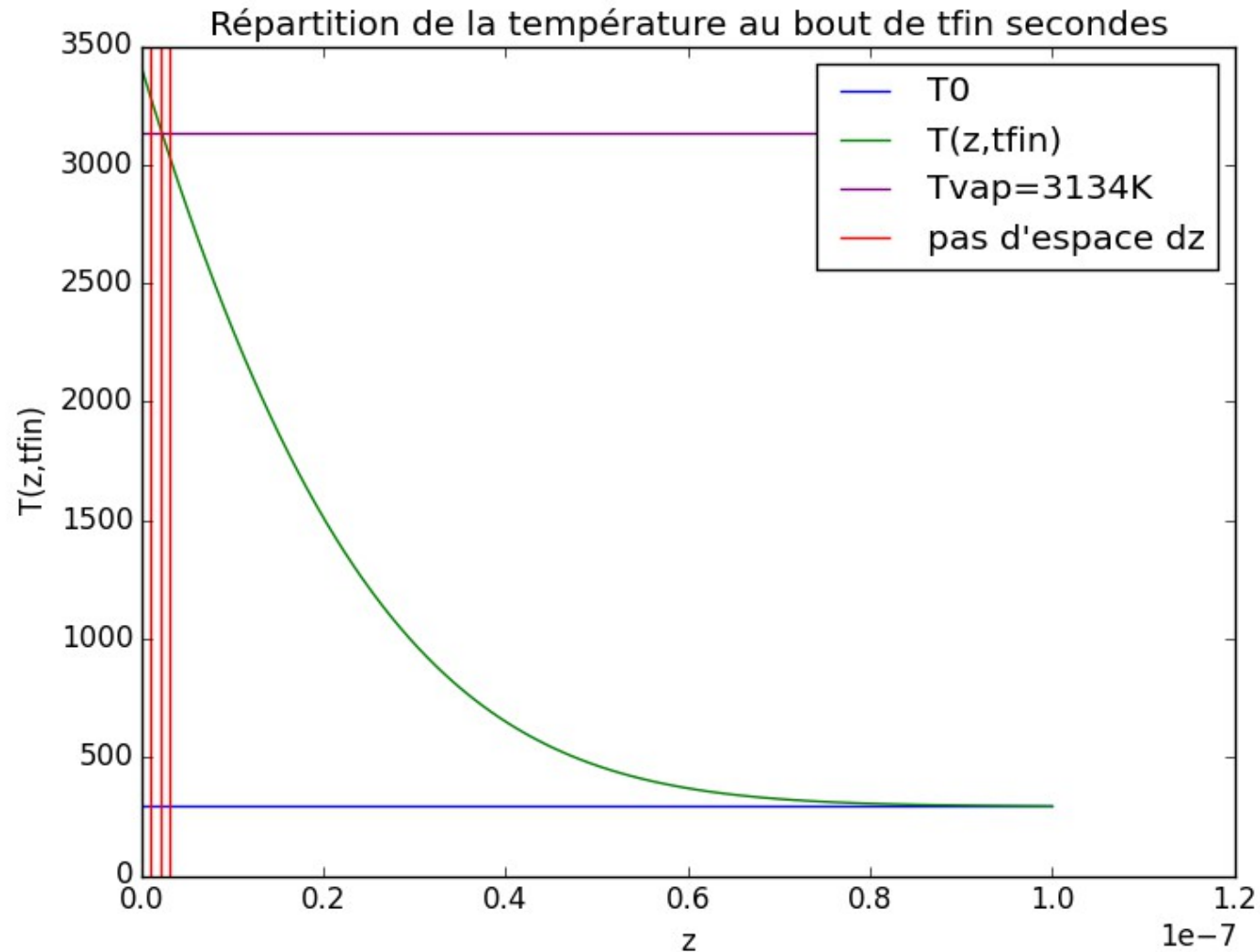
- Résolution à l'aide de python
- But : obtenir $T(z)$ au bout de t_{fin}
- Condition initiale : $T(z,0) = T_0 = 293k$
- Conditions aux limites : condition de Neumann :

$$j(0,t) = \frac{P}{S} \quad \text{donc} \quad -\mu \frac{\partial T(0,t)}{\partial z} = \frac{P}{S}$$

- Condition de dirichlet : $T(z_{\text{fin}}, t) = T_0$
- $T[0] = T[1] + (dz * P) / (\mu * S)$
- $(T(z, t + dt) - T(z, t)) / dt = (K / dz^2) * (T(z + dz, t) + T(z - dz, t) - 2T(z, t))$
- $T[j] = T[j] + (Kdt) / (dz^2) * (T[j+1] + T[j-1] - 2 * T[j])$
- $T[nz-1] = T_0 = 293 \text{ k}$

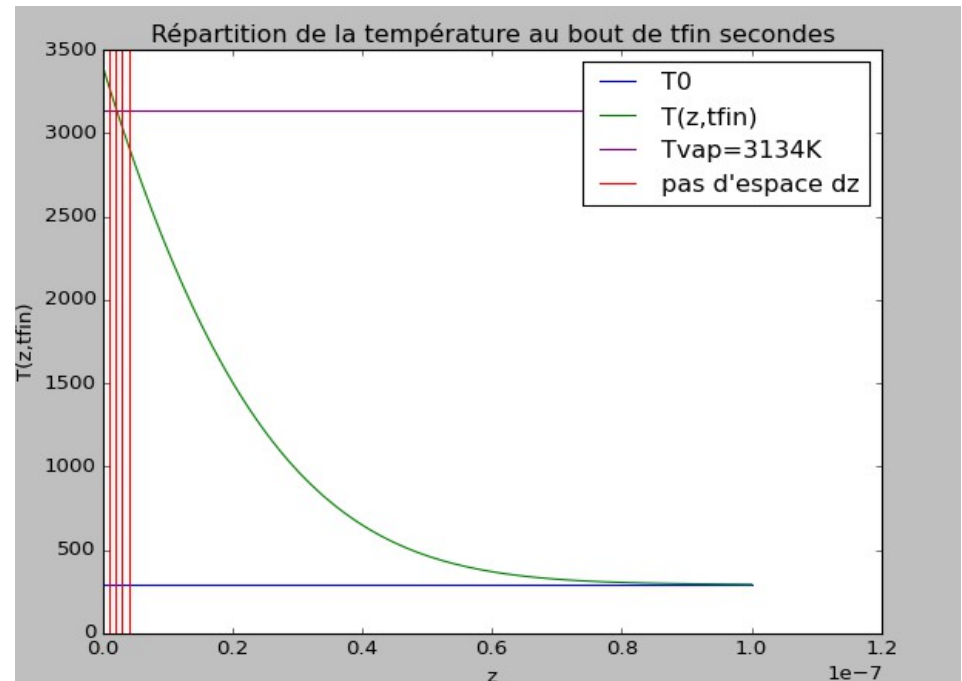
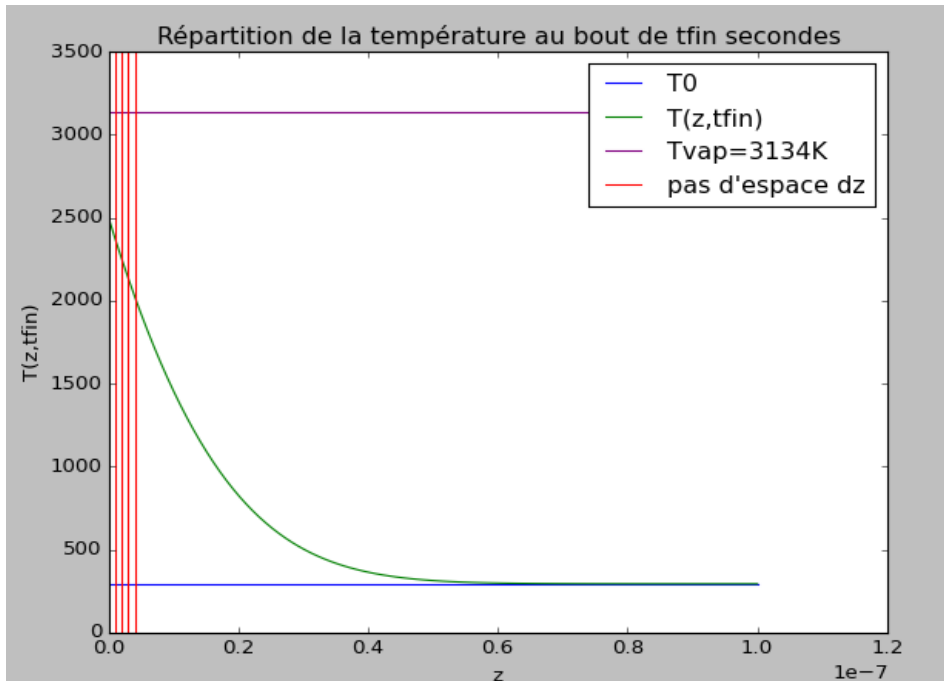
t \ z	0	dz	2dz	3dz
0	*	*	*	*
dt				
2dt				
3dt				

- Chauffage jusqu'à vaporisation puis mesure de l'épaisseur ablatée.



Temps d'interaction t_{fin} (s) à partir duquel il y a vaporisation (s)	Puissance (W)	dz (m)
$2e-11$	$1e7$	$1e-9$
$2e-9$	$1e6$	$1e-8$
$2e-5$	$1e4$	$1e-6$

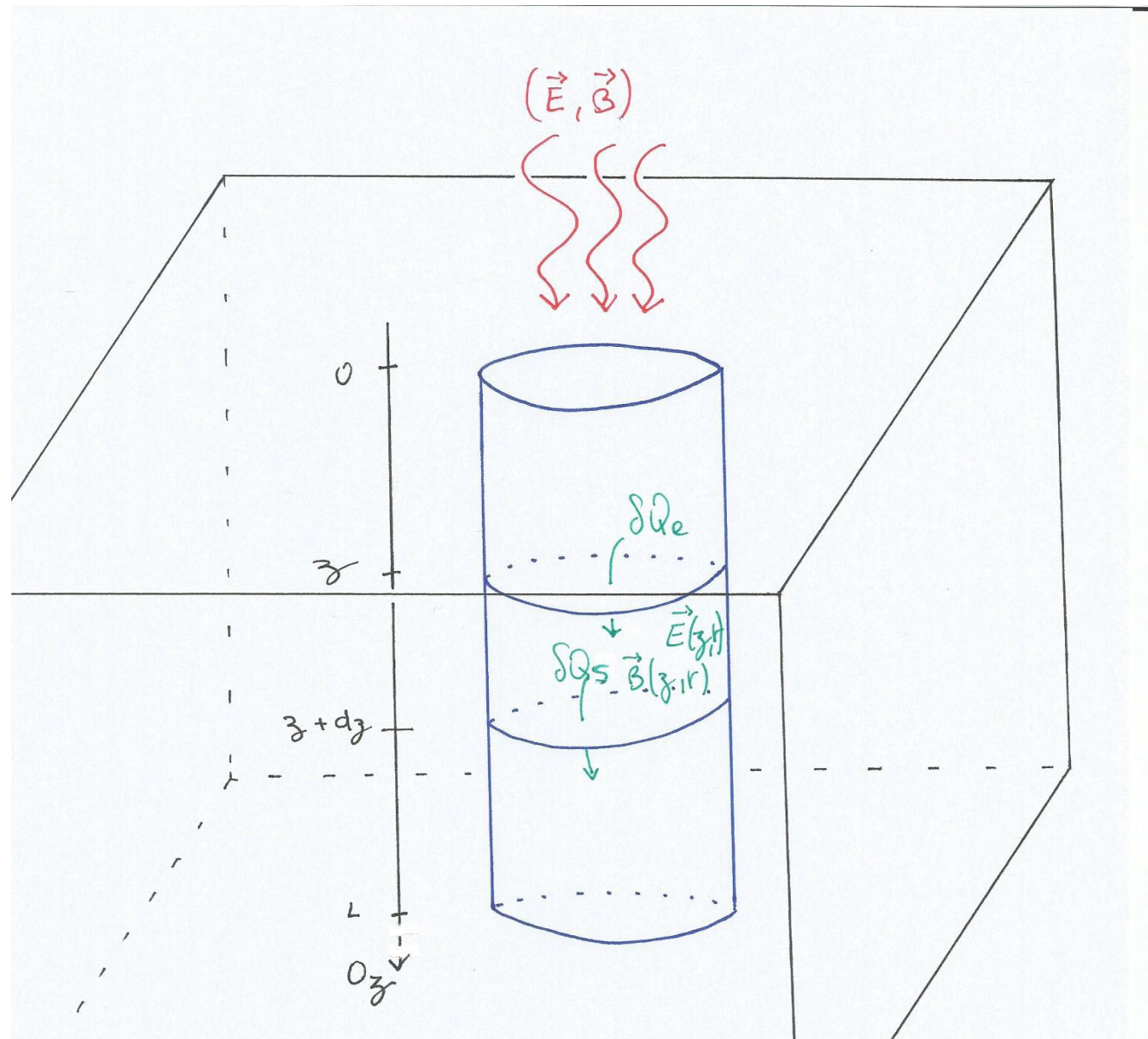
- Plus la puissance est faible plus dz est grand
- On fixe P à 10 MW



Première conclusion

- Une épaisseur minimale de 2 nm a été vaporisée : petit devant la profondeur attendue :
Selon le laboratoire ICB : 10-100 nm

II) Deuxième modèle : puissance électromagnétique apportée par le laser



$$dH = \delta Q_e - \delta Q_s + P_{vol} S dz dt$$

$$\text{donc} \quad \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} + \frac{P_{vol}}{\rho c p}$$

$$\text{où} \quad P_{vol} = \gamma \langle E^2 \rangle, \quad \vec{E} = E_0 e^{-\frac{z}{\delta}} \cos\left(\omega t - \frac{z}{\delta}\right) \vec{e}_z$$

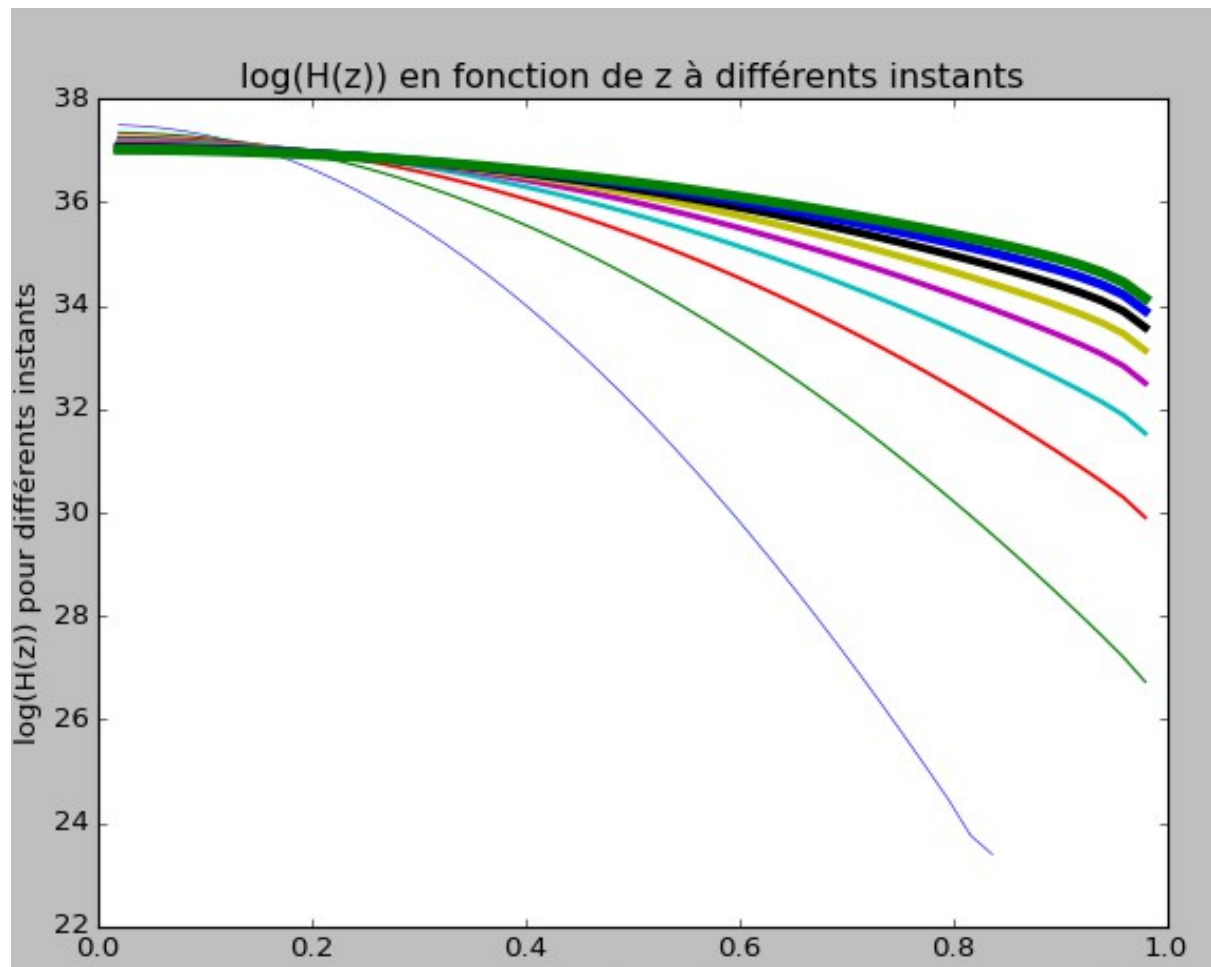
$$\text{avec} \quad E_0 = \sqrt{\frac{2\mu_0 c P}{S}} \quad \text{et} \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \gamma \omega}} = \sqrt{\frac{\lambda}{\mu_0 \gamma c \pi}} = 12 \text{ nm}$$

$$\text{donc} \quad \frac{P_{vol}}{\rho c p} = \gamma \frac{\mu_0 c P}{S} e^{-\frac{2z}{\delta}}$$

- On cherche à montrer que P_{vol} est négligeable et ne participe pas au chauffage

$$\frac{K \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2}}{\frac{P_{vol}}{\rho c p}} = \underbrace{\frac{\mu S}{dz^2 \gamma c \mu_0 P} e^{\frac{2z}{\delta}} \left(T(z+dz,t) + T(z-dz,t) - 2T(z,t) \right)}_{H(z,t)}$$

- On trace H en fonction de z à différents instants



L'épaisseur des courbes croît avec le temps.

Seconde conclusion

- $\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \gamma \omega}} = \sqrt{\frac{\lambda}{\mu_0 \gamma c \pi}} = 12nm$ et $l_D = \sqrt{K t_{fin}} = 20nm$
- La température varie sur quelques δ
- La puissance volumique due au champ électromagnétique est négligeable

Conclusion générale

- Premier modèle : 2 nm
- Second modèle : le champ électromagnétique est négligeable
- Interaction avec le milieu ambiant : réaction chimique avec l'air : oxydation
- Pression et métal liquide : mouvement du fluide
- Ionisation des vapeur de métal
- Plasma : onde acoustique dans le métal donc déformation du métal

Annexe

$$dH = \delta Q_e - \delta Q_s$$

$$cp\rho\pi r^2 dz dT = \underbrace{\varphi(z,t) dt}_{j(z,t)\pi r^2} - \underbrace{\varphi(z+dz,t) dt}_{j(z+dz,t)\pi r^2}$$

$$\rho cp \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = - \frac{\partial j(z,t)}{\partial z}$$

$$\text{or } j = -\mu \frac{\partial T(z,t)}{\partial z}$$

$$\text{Donc } \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} \text{ avec } K = \frac{\mu}{\rho cp}$$

```

def resolD(tfin,zfin,P):    #duree, profondeur, puissance
    nt=20000
    nz=50
    t=[]
    z=[]
    dt=tfin/(nt-1)
    dz=zfin/(nz-1)
    for i in range (nt):
        t.append(i*dt)
    for i in range(nz):
        z.append(i*dz)
    T = nz*[0]
    # condition initiale
    for i in range (nz):
        T[i]=T0
    C=K*dt/dz**2
    for i in range (0,nt-1):
        T[0] = T[1] + (dz*P)/(mu*S)    # condition limite à gauche Neumann
        T[nz-1] = T0 #condition limite à droite
        for j in range (1,nz-1):
            T[j] += C*(T[j+1]+T[j-1]-2*T[j])
    plot(z,nz*[T0],label="T0")
    plot(z,T,label="T(z,tfin)")
    plot(z,nz*[3134],color = 'purple', label="Tvap=3134K")
    axvline(x=dz,color='red',label="pas d'espace dz")
    axvline(x=2*dz,color='red')
    axvline(x=3*dz,color='red')
    axvline(x=4*dz,color='red')
    title('Répartition de la température au bout de tfin secondes')
    ylabel('T(z,tfin)')
    xlabel('z')
    legend()
    show()

```


Pvol négligeable

```
def resolDneg(tfin,zfin,P):
    nt=2000
    nz=50
    t=[]
    z=[]
    dt=tfin/(nt-1)
    dz=zfin/(nz-1)
    for i in range (nt):
        t.append(i*dt)
    for i in range(nz):
        z.append(i*dz)
    T=np.zeros((nt,nz),float) #t vari avec les lignes et r avec les colonnes
    # condition initiale
    for i in range (nz):
        T[0,i]=T0
    C= (K*dt)/dz**2
    for i in range (0,nt-1): # i : indice temps , j indice espace
        T[i,0] = T[i,1] + (dz*P)/(mu*S) # condition limite à gauche Neumann
        T[i,nz-1] = T0
        #résolution
        for j in range (1,nz-1):
            T[i+1,j]=T[i,j]+C*(T[i,j+1]+T[i,j-1]-2*T[i,j])

    H=np.zeros((nt,nz),float)
    for i in range (nt):
        for j in range (1,nz-1):
            H[i,j]=(mu/dz**2*gam*c*mu0*P)*(T[i,j+1]+T[i,j-1]-2*T[i,j])*exp(2*j*dz/delt)
    for k in range (1,10):
        plot(z[:],log(H[k*(nt//10),:])/log(10),linewidth=k/2)
    xlabel('profondeur z (m)')
    ylabel('log(H(z)) pour différents instants')
    title('log(H(z)) en fonction de z à différents instants')
    show()
```