

Longueur de pénétration d'un signal de température

La diffusivité thermique D permet de caractériser la profondeur de pénétration δ

(parfois profondeur de peau thermique) d'un signal de température périodique sinusoïdal imposé à la surface d'un milieu continu (ou massif) semi-infini (remarque : cette formule s'appliquant à un milieu semi-infini, il n'est pas possible de l'utiliser sur un milieu d'épaisseur limitée).

$$\delta = \sqrt{(2D/\omega)} = \sqrt{(DT/\pi)} \quad \text{en mètre}$$

où si T est la période en secondes de la température sinusoïdale ω est la pulsation du signal de température périodique, en $[\text{rad.s}^{-1}]$ avec $\omega = 2\pi/T$ avec T la période en secondes de la température sinusoïdale

Le signal sinusoïdal de température à la profondeur z dans le massif semi-infini est amorti de façon exponentielle dans cette épaisseur avec une longueur caractéristique δ par un coefficient $e^{-z/\delta}$ et retardé avec un déphasage de z/δ radians.

Conséquences pratiques :

Au delà de 2 à 3 fois cette longueur caractéristique de pénétration par diffusion, presque rien ne pénètre des oscillations sinusoïdales de température.

Cette longueur de pénétration pour un matériau typique à **diffusivité de 1 mm²/s** (environ pour argile ou terre) est pour une **période T_p de une seconde de 0,564mm, à multiplier par la racine carrée de T_p en secondes.**

Pour **un jour** elle est de racine de 24x3600 fois plus longue soit **166mm**

Pour **un an** avec 365 jours, elle est racine de 365 fois plus la précédente soit **3,168m** et donc au delà de 10 m de profondeur sous terre les oscillations annuelles de température ne pénètrent plus. Dans la terre pleine d'humus très riche en végétaux comme la paille, (mur en torchi) avec **$D=0,1\text{mm}^2/\text{s}$ minimum possible pour D** , ce peut être **3 fois moins**, et donc 1 à 2 mètres de torchi isole en intersaison de l'été pour l'hiver .

A la profondeur de pénétration le déphasage est de 1 radian soit 56,3° pour une atténuation des oscillations par 1/e soit par 0,368

Conséquences très concrètes, élémentaires, importantes et pratiques faciles à retenir

La température avec la chaleur diffuse, ce qui est une transmission totalement très différente de la propagation à vitesse finie, car **le temps d'arrivée du changement de la température croît comme le carré de l'épaisseur** de la distance à franchir, c'est à dire que la vitesse apparente décroît comme la racine carrée de l'épaisseur :

1) **La diffusivité thermique est souvent proche de 1** en 10⁻⁶ m²/s identique à **mm²/s** (entre 0,1 et 1,5) pour beaucoup de corps, sauf les métaux purs et isolants très légers, (voir wikipedia diffusivité thermique pour des valeurs) et elle donne directement le temps typique pour que la température diffuse à travers une épaisseur donnée du matériau :

Pour 1mm d'épaisseur de matériau à diffusivité de **1 mm²/s** , **comme l'argile la température met 1**

seconde typiquement pour diffuser à travers ce mm .

Pour **1cm= 10mm** c'est $10 \times 10 = 100$ **secondes**

On utilise cette propriété pour **mesurer facilement la diffusivité** avec une plaque d'**épaisseur d** chauffée d'un côté (par un laser par exemple, méthode dite « Laser Flash ») et en **mesurant le temps t d'arrivée d'un signal moitié en température de l'autre côté** qui **donne D** avec la relation 2

$$D = 1,37 / \pi^2 d^2 / t$$

Pour **10cm = 100mm** c'est $100 \times 100 = 10000$ s = **2h46min**

pour **1m = 1000mm** on attend environ $1000 \times 10000 = 1$ million de secondes soit **11 jours 13h** pour voir arriver de façon significative la température

pour **4m** cela prend $4 \times 4 = 16$ fois plus de temps soit 16 fois 11 jours égal à **185 jours**, plus de 6 mois pour voir arriver la température.

10m c'est **3 ans 2 mois** environ 100 millions de secondes

100m c'est 317ans 100 fois plus que le précédent

1km c'est 31700 ans de nouveau 10 fois plus

10km c'est 3millions d'ans, 170979

et pour 100km c'est 317 millions d'an , dans la gamme des temps de formation des continents et de nombreux volcans.

Pour du bois ou autre chose 10 fois moins diffusif, à environ 0,1mm²/s, comme du torchi avec de la paille, cela prend la racine carrée de 10 fois plus, soit 3,16 fois plus longtemps, pour commencer à bien voir arriver la variation de température.

Donc la chaleur met un temps très long à passer à travers une paroi un peu épaisse, en France la terre ne gèle jamais à 1m de profondeur (sauf en haute montagne) et dans une grotte à plus de 10 mètres de profondeur la température est la moyenne sur plusieurs années de la température extérieure.

La géothermie profonde prend la chaleur de la terre en la refroidissant, qui en général revient par diffusion thermique, ce qui entraîne que cette chaleur ne revient que très lentement dès qu'on a refroidi un volume de dimension supérieur à quelques dizaines de m et provoque un tarissement apparent de la source de chaleur géothermique, très gênant, en quelques dizaines d'années, pour une source de chaleur géothermique qui semble inépuisable et gratuite. Aussi elle ne marche longtemps que sur des volcans (Islande ou Italie) ou avec la chance de circulation d'eaux chaudes, plus ou moins proches de volcans .

Une application est de conserver la chaleur du jour pour la nuit (ou l'inverse en été pour climatiser) dans un volume de terre, galets, ou de matériau pas cher de dimension de plus de 0,5 à 1m (inutile de prendre un réservoir d'eau) ou même de conserver la chaleur solaire de l'été, forte, gratuite et gaspillée, pour se chauffer l'hiver gratuitement, dans un volume de terre de plus de 10m de dimension, juste parcourue de tuyaux espacés de 2m environ.

Cela, un puits canadien intersaison à recharge solaire en été, a été réalisé et fonctionne depuis 2007 à Drake Landing Solar community dans le Canada 4 dans la terre forée avec des tuyaux échangeurs

espacés de 2m sur un volume cylindrique d'environ 30m de diamètre et 30 m de profondeur pour chauffer l'hiver 52 pavillons gratuitement et à perpétuité, sans pollution, ni CO2 ni particules, sans pompe à chaleur, avec la chaleur solaire de l'été gratuite conservée pour l'hiver, grâce à cette lenteur de la diffusion de la chaleur .

Les romains et très anciens , utilisaient cette lenteur de diffusion thermique pour conserver la glace de l'hiver pour l'été, Glacière, dans des grandes caves, sans isolation autre que les murs et la terre épaisse derrière.

Ces solutions pour chauffer ou climatiser, gratuites une fois installées, et perpétuelles, sans la moindre pollution, avec aucune émission de CO2, sont trop négligées, par suite du prix trop bas des énergies fossiles actuelles, qui n'incite pas à investir à long terme des solution gratuites à perpétuité.