

Etudes thermiques

Sophie EVE, Gislaine MARIE



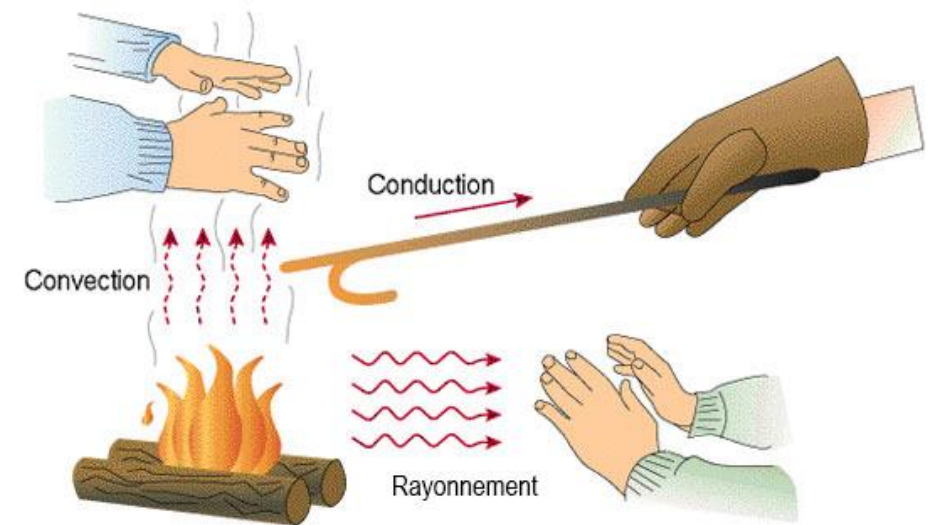
L'École des INGÉNIEURS Scientifiques

TYPES D'ANALYSE ET THEORIE ETAT STATIONNAIRE ET MODE TRANSITOIRE

Une analyse thermique consiste à calculer les températures aux nœuds du modèle, puis à en dériver ces données pour obtenir par exemple les gradients de température aux nœuds et sur les éléments, les gains ou les pertes de chaleur aux nœuds, ou encore les flux de chaleur aux nœuds et sur les éléments.

ANSYS permet une gamme complète d'analyses thermiques, prenant en compte, entre autres, les trois modes primaires de transfert de chaleur :

- la conduction (dans les solides)
- la convection (libre ou forcée)
- la radiation



TYPES D'ANALYSE ET THEORIE

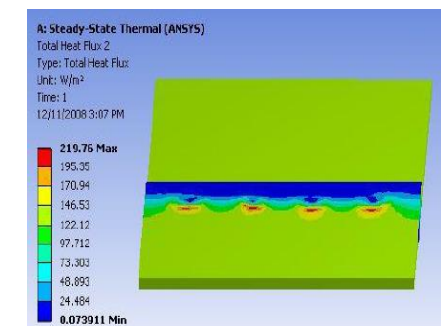
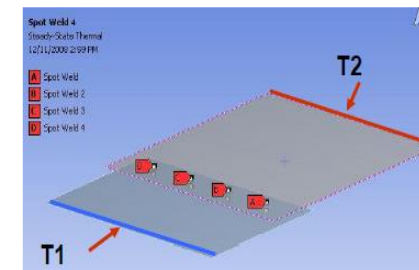
ETAT STATIONNAIRE ET MODE TRANSITOIRE

- Les analyses thermiques en état stationnaire s'appliquent pour des situations où la distribution de température et les grandeurs thermiques associées ne varient que très peu dans le temps.
- Les analyses en mode transitoire prennent en compte les cas où la chaleur et ses effets varient dans le temps.

Tous les types de corps peuvent être modélisés par analyse thermique, y compris ceux faisant intervenir des géométries 1D (la température varie alors le long de l'élément, et reste constante dans sa section) ou des sections minces (la température varie au travers des surfaces, mais pas suivant son épaisseur).

Les régions en contact sont automatiquement créées et gérées par le logiciel pour permettre le transfert thermique entre les différentes parties d'un système assemblé. Par défaut, le contact est supposé parfait, c'est-à-dire qu'on a la même température de chaque côté de l'interface, et la conductivité thermique de contact est prise égale à la conductivité du matériau qui présente la plus forte valeur.

On peut spécifier si le transfert thermique est autorisé ou non, ou spécifier des transferts de température uniquement en certains points (cas typique d'une soudure par points), ou encore renseigner une valeur de résistance de contact.



TYPES D'ANALYSE ET THEORIE

MODE STATIONNAIRE

On utilise ce type d'analyse pour déterminer les températures, gradients thermiques, débits thermiques et flux de chaleur dans un objet, créés par des chargements thermiques qui ne varient pas dans le temps.

Ces chargements peuvent être de type :

- température (constante, le transfert se fait par conduction)
- convection,
- radiation,
- gain ou perte de chaleur (éléments linéiques),
- flux de chaleur (soit un transfert thermique par unité d'aire),
- génération de chaleur (c'est-à-dire un transfert thermique par unité de volume).

Génération de chaleur	$W.m^{-3}.K^{-1}$
Flux de chaleur	$W.m^{-2}.K^{-1}$
Convection	$W.m^{-2}.K^{-1}$
Radiation	$W.m^{-2}.K^{-1}$

Une analyse thermique stationnaire peut être soit linéaire (pour un matériau présentant des propriétés constantes avec la température), soit non linéaire (dans le cas de matériaux dont les propriétés sont dépendantes de la température - cas de la grande majorité des matériaux + chargement de type radiatif).

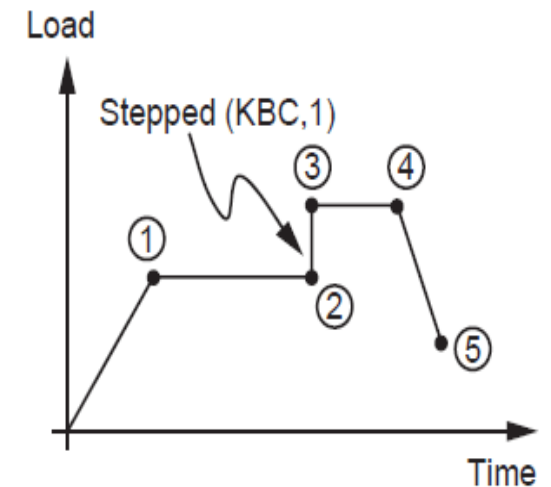
TYPES D'ANALYSE ET THEORIE

MODE TRANSITOIRE

Une analyse thermique en mode transitoire permet d'appliquer des chargements qui sont des fonctions du temps (ex : trempe d'un matériau lors d'un traitement thermique).

On peut définir un chargement dépendant du temps :

- en donnant une équation ou une fonction décrivant la courbe du chargement appliqué (*Function Tool*),
- en divisant la courbe chargement-temps en différentes étapes individuelles : chaque « inflexion » de la courbe correspond alors à une étape. Il faut préciser pour chaque étape la valeur du chargement et sa durée, ainsi que s'il s'agit d'une marche (*rampe*) ou d'un plateau (*stationnaire*). On peut alors résoudre le calcul en prenant en compte la globalité des étapes, ou bien étape par étape (et visualiser ainsi comment chaque étape influence les grandeurs calculées).



Ce sont ces températures que l'on utilise par la suite comme input d'une analyse structurale, pour évaluer les contraintes thermiques subies par des systèmes tels que des blocs moteur, des tuyauteries, ou des joints.

ANALYSE THERMIQUE

MISE EN EQUATION

L'expression de l'équilibre thermique la plus générale pour des cas statiques est :

$$[K]\{u\} + [R]\{u + T_{abs}\}^4 = \{P\} + \{N\}$$

Dans le cas transitoire, cette équation devient :

$$[K]\{u\} + [R]\{u + T_{abs}\}^4 + [B]\{\dot{u}\} = \{P\} + \{N\}$$

- avec
- $[K]$ la matrice de conduction thermique
 - $\{u\}$ le vecteur des températures (inconnues)
 - $[R]$ la matrice des échanges par radiation
 - T_{abs} l'offset de température depuis la température absolue nécessaire pour la radiation
 - $\{P\}$ le vecteur des flux de chaleur constants appliqués
 - $\{N\}$ le vecteur des températures dépendant de ces flux de chaleur
 - $[B]$ la matrice de capacité calorifique
 - $\{\dot{u}\}$ la dérivée du vecteur des températures par rapport au temps

ANALYSE THERMIQUE

CONDUCTION

La conduction est un mode de transfert thermique simple, provoqué par une différence de température entre deux régions d'un même milieu, ou entre deux milieux en contact, se réalisant sans déplacement global de matière (à l'échelle macroscopique, par opposition à la convection).

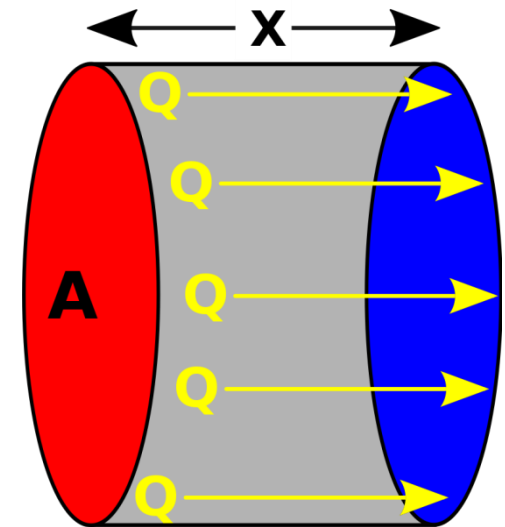
Elle peut s'interpréter comme la transmission de proche en proche de l'agitation thermique : un atome (ou une molécule) cède une partie de son énergie cinétique à l'atome voisin.

La conduction thermique est décrite par la loi de Fourier, dans laquelle la densité de flux thermique est proportionnelle au gradient de température :

$$\vec{q} = \lambda \overrightarrow{\text{grad}}(T)$$

La constante de proportionnalité λ est nommée conductivité thermique du matériau. Elle est toujours positive, et faiblement dépendante de la température.

La conductivité thermique est la seule valeur à renseigner dans le cas d'une analyse stationnaire.



Chaleur spécifique et capacité calorifique

La chaleur spécifique est une autre propriété intrinsèque des matériaux. Lorsqu'on la multiplie par le volume ou la densité du matériau, on parle alors de capacité calorifique massique ou volumique.

Elle correspond à la quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un degré la température d'un corps.

Du fait que dans l'équation de conduction thermique $dq = C \times dT$, la capacité calorifique multiplie la dérivée de la température par rapport au temps, l'utilisation de la chaleur spécifique dans les calculs n'est pertinente que dans des **analyses de phénomènes thermiques transitoires** (dépendants du temps).

Dans des problèmes typiques de transfert de chaleur, les plus grandes variations de la chaleur spécifique sont généralement attribuées à des changements de phases des matériaux.

ANALYSE THERMIQUE

CONVECTION

Un chargement par convection est un chargement surfacique, appliqué sur les surfaces externes d'un modèle, afin de prendre en compte la chaleur perdue vers un fluide environnant.

- La convection libre correspond à un transport de chaleur par un fluide, pour lequel le mouvement du fluide est créé par le procédé de transport thermique, et non forcé par une source externe, tel qu'un ventilateur.
- La convection forcée est un phénomène de transfert de chaleur incluant un transport de chaleur et un écoulement de fluide forcé par un système extérieur (pompe, ventilateur). Le transfert thermique entre le courant de fluide et l'environnement est pris en compte à travers le coefficient de transfert thermique, qui peut être déterminé par le logiciel par le calcul des nombres de Reynolds et Prandtl :

$$h = k/d \times C \times Re^r \times Pr^p$$

avec k la conductivité du fluide, d la densité du fluide, C une constante, Re le nombre de Reynolds, r son exposant, Pr le nombre de Prandtl, et p son exposant.

L'expression du flux de chaleur transféré est alors : $q = h \times A \times (T_{surface} - T_{amb})$

avec A l'aire de la surface considérée, $T_{surface}$ la température de sa surface et T_{amb} la température ambiante.

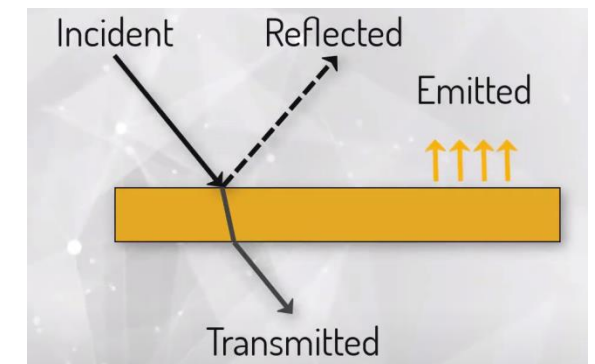
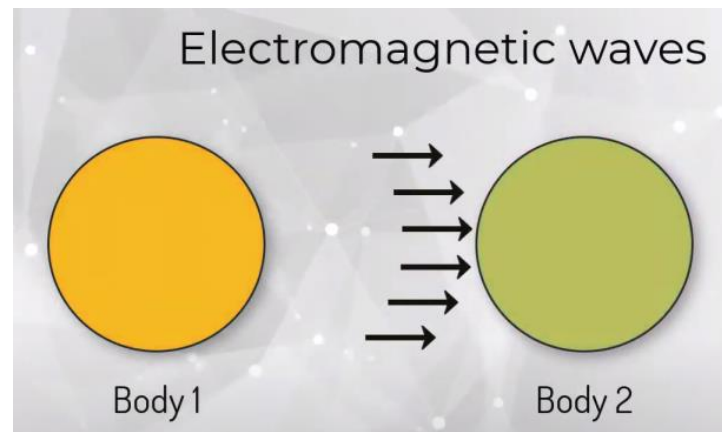
ANALYSE THERMIQUE

RADIATION

La radiation est un cas de transfert thermique entre deux corps ne nécessitant pas de média : il s'agit d'un transfert d'énergie par ondes électromagnétiques, avec émission de rayonnement par un corps chaud, et absorption de l'énergie électromagnétique et conversion en énergie thermique (chaleur) par un autre corps ou l'environnement (Ex : radiation solaire).

Les radiations thermiques correspondent à une petite bande du spectre électromagnétique, entre la fin du domaine visible (≈ 800 nm) et le domaine des micro-ondes (≈ 1 mm). Tout corps à une température >0 K émet des radiations thermiques, principalement dans l'infra-rouge.

Ansys considère les surfaces comme des « corps gris », c'est-à-dire que l'énergie absorbée est la différence entre l'énergie incidente et l'énergie réfléchie, et l'énergie sortante est la différence entre l'énergie émise et l'énergie absorbée.



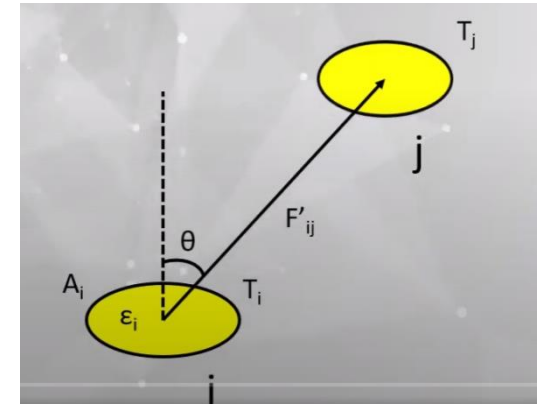
ANALYSE THERMIQUE

RADIATION

La radiation est un mode de transfert de chaleur fortement non-linéaire, car l'expression de Stefan-Boltzmann décrivant le transfert de chaleur par radiation varie à la puissance 4 de la température :

$$q = \sigma V \varepsilon A (T_i^4 - T_j^4)$$

avec σ la constante de Stefan-Boltzmann ($5.668 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$),
 V le facteur radiatif entre les deux surfaces,
 ε l'émissivité de la surface,
 A l'aire de la surface irradiante,
 T_i et T_j les températures des deux surfaces.



L'émissivité ε représente la quantité d'énergie émise par une surface (à $T > 0\text{K}$), et est définie comme le rapport entre l'énergie émise par une surface et l'énergie émise par un corps noir à la même température : $0 < \varepsilon < 1$.

Le facteur radiatif V entre deux surfaces est calculé à partir de l'orientation entre les deux surfaces, et représente la façon dont les surfaces « se voient ». Ce facteur est particulièrement difficile à calculer de façon analytique pour un modèle complexe. On laisse généralement le logiciel calculer ce facteur de façon automatique, en réalisant une analyse en deux étapes, contenant une analyse stationnaire qui sert à fixer les conditions initiales du système, et donc à calculer ce facteur radiatif, avant de procéder à l'analyse radiative à proprement dite.

ANALYSE THERMIQUE

PROPRIETES THERMIQUES DES MATERIAUX

Les analyses thermiques sous ANSYS demandent la connaissance des propriétés thermiques suivantes :

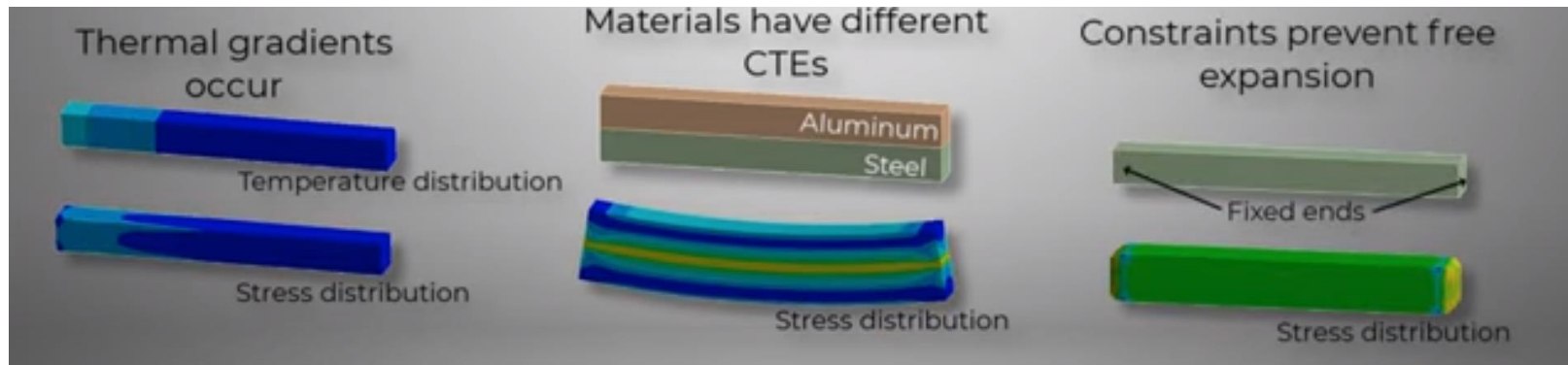
- conductivité thermique
- densité
- génération interne de chaleur (émissivité)
- chaleur spécifique à pression constante
- température et chaleur latente associée à des phénomènes de changement de phases
- viscosité dynamique

Conductivité thermique	$W.m^{-1}.K^{-1}$
Densité	$kg.m^{-3}$
Chaleur spécifique	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
Enthalpie	$J.kg^{-1}$
Chaleur latente	$J.kg^{-1}$

ANALYSE COUPLEE THERMO-MECANIQUE

Les changements de température induisent des déformations, et possiblement des contraintes (cas d'assemblages de matériaux présentant des CTE différents, ou d'assemblages contraints pour la dilatation ou la contraction), qui peuvent être évaluées dans le cadre d'une analyse couplée (analyse qui implique au moins 2 analyses appartenant à un domaine différent) thermique – structurale.

Les analyses thermo-structurales correspondent à des cas simples de couplage, de type analyses « unidirectionnelles » (le champ de température induit des déformations, mais les déformations mécaniques résultantes n'affectent pas la distribution de température du système).



$$\varepsilon^T = \alpha \Delta T$$

Avec α le coefficient
d'expansion thermique
(CTE)

ANALYSES THERMIQUES ET THERMO-MECANIQUES BUT DU TP

Nous souhaitons vous familiariser avec les analyses thermiques, en régime stationnaire et transitoire, et les analyses thermo-mécaniques, en lien avec l'industrie nucléaire et vos TD de thermique.

Le TP comporte 3 parties :

- Un calcul de thermique stationnaire,
- Un calcul couplé thermique stationnaire – mécanique statique,
- Un calcul de thermique transitoire.

