

Ecole Publique d'Ingénieurs en 3 ans

Enoncé du TP2

SIMULATION NUMERIQUE

Année 2023-2024

Sophie EVE
Joseph LE CLOAREC

sophie.eve@ensicaen.fr
joseph.le-cloarec@ensicaen.fr



www.ensicaen.fr

TP5 –CALCULS THERMIQUES ET THERMO-MECANIQUES SUR ANSYS

L'objectif de ce TP est de vous initier aux calculs thermiques, permettant de calculer la distribution de températures et les différentes données thermiques relatives (quantité de chaleur gagnée ou perdue, gradients thermiques, flux thermique,...) dans un système ou un composant. Les simulations thermiques jouent un rôle important pour le design de nombreuses applications d'ingénierie, telles que les moteurs à combustion interne, les turbines, les échangeurs de chaleur, les systèmes de tuyauterie ou encore les composants électroniques. Dans la majorité des cas, une analyse thermique est suivie d'une analyse mécanique afin de calculer les contraintes créées par l'expansion ou la contraction du matériau, on parle alors de calculs thermo-mécaniques.

1.1. 1. Mise en application 1 – Analyse thermique

Un élément combustible est constitué d'un long cylindre de thorium de diamètre $D = 25$ mm recouvert d'une gaine d'aluminium d'épaisseur $e = 1$ mm. Le bureau d'études chargé de la conception du réacteur propose que celui-ci fonctionne dans les conditions suivantes :

- puissance thermique volumique dégagée par le thorium uniforme et égale à $q'' = 7.108$ W/m³
- coefficient de convection du système de refroidissement $h = 7000$ W.m⁻².K⁻¹
- température du fluide de refroidissement $T = 95$ °C

Cette proposition vous paraît-elle satisfaisante compte tenu des propriétés thermiques et des températures de fusion des matériaux utilisés ?

Aluminium :

- Température de fusion $T_f = 933$ K
- Conductivité thermique $k = 237$ W.m⁻¹.K⁻¹

Thorium :

- Température de fusion $T_f = 2023$ K
- Conductivité thermique $k = 60$ W.m⁻¹.K⁻¹

A des fins de vérification des résultats de votre analyse, on donne le profil de température dans un cylindre de rayon R :

$$T(r) = \frac{q''R^2}{4k} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) + T_s$$

où k est la conductivité thermique et T_s la température de la surface extérieure du cylindre.

On demande ici d'étudier les champs de température et les flux thermiques, en considérant un échange par convection avec un fluide caloporteur. Les différentes parties étant considérées maintenues à des températures constantes, il s'agit donc d'un problème de thermique stationnaire.

- Géométrie : nous allons procéder ici à une analyse 2D (à préciser dans le workbench, Géométrie > Type d'analyse > 2D). Créer ensuite la géométrie dans Design Modeler, en vous plaçant dans le système d'unités millimétrique : onglet Unités de la barre des tâches > Système métrique (kg, mm, s, °C, mA, N, mV).

On va dans un premier temps créer le combustible (cercle de diamètre 25 mm) et la surface correspondante (onglet Conception > Créer des surfaces à partir d'esquisses), puis la gaine dans une nouvelle esquisse, à partir de 2 cercles concentriques de diamètres 25 et 27 mm (épaisseur de la gaine de 1 mm), et la surface correspondante (couronne, onglet Conception > Créer des surfaces à partir d'esquisses, en précisant « ajouter un corps bloqué » pour créer un second corps qui possédera un matériau différent du combustible et sera maillé indépendamment).

- Matériaux : on va commencer par sélectionner les deux matériaux depuis la bibliothèque ANSYS. Pour cela, dans l'arbre du projet, cliquez sur l'onglet Matériaux, et dans la bibliothèque, sous l'item Matériaux explicites, cherchez Thorium, et Aluminium, et ajoutez-les au projet en cliquant sur le signe « + » au bout de la ligne. Vérifiez que les propriétés thermiques déjà renseignées sont exactes, si non, dupliquez la fiche matériau et changez les valeurs inexactes. Revenez au projet, et mettez à jour. On peut alors assigner un matériau au combustible et à la gaine.

- Interfaces : on considère ici une interface parfaitement liée.

- Maillage : on va générer un maillage, en s'assurant d'un maillage régulier, suffisamment fin, et en imposant un certain nombre d'éléments dans l'épaisseur de la gaine.

- CAL : on considère que la température du fluide caloporteur est de 95°C. On va donc considérer qu'il s'agit là de la température initiale du système, et donc définir une température initiale uniforme de 95°C pour l'ensemble du système.

- Chargement : la chaleur est générée par le thorium. On va imposer un chargement de type génération de chaleur (transfert thermique par unité de volume), de puissance 7.108 W/m3.

Le fluide caloporteur est maintenu à une température de 95°C (condition de température).

La chaleur générée va diffuser dans le fluide caloporteur par ses surfaces externes de la gaine, via un phénomène de convection forcée avec un coefficient de convection $h = 7000 \text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$.

- Résultats : visualisez la répartition des températures et les flux thermiques dans le système, et statuez quant à la tenue des matériaux proposés.

1.2. 2. Mise en application 2 – Analyses thermique et thermo-mécanique

On se propose d'étudier ici le profil de température d'un crayon de REP, comme décrit ci-dessous (Figure 1), dans le cas où la conductivité du combustible k_c est dépendante ou indépendante de la température.

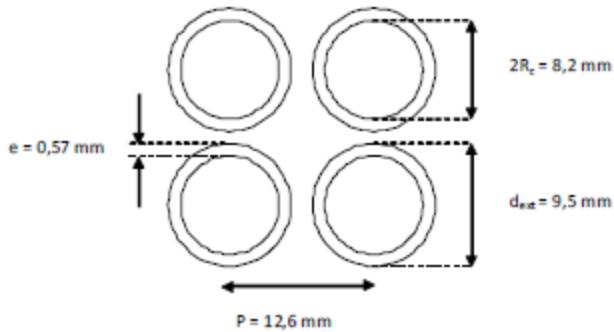


Figure 1 : Dimension d'un sous-canal de REP électrogène

On donne :

- Rayon combustible : $R_c = 4.1 \text{ mm}$
- Epaisseur gaine : $e = 0.57 \text{ mm}$
- Résistance de contact : $R_{th} = 1.5 \text{ K.cm}^2.\text{W}^{-1} = 150 \text{ K.mm}^2.\text{W}^{-1}$ conductance=6.7.10-3
- Conductivité du combustible : $k_c = 3.5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Conductivité de la gaine : $k_g = 13 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- CET combustible : $1.10^{-5} /^\circ\text{C}$
- CET gaine : $5,7.10^{-6} /^\circ\text{C}$
- Puissance linéique $q = 190 \text{ W.cm}^{-1}$
- Température du caloporteur $T = 300 \text{ }^\circ\text{C}$
- Coefficient de convection $h = 36000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, estimé à partir d'un débit du fluide caloporteur dans le canal $M = 0.32 \text{ kg/s}$

On demande ici d'étudier les champs de température et les flux thermiques, en considérant un échange par convection avec un fluide caloporteur. Les différentes parties étant considérées maintenues à des températures constantes, il s'agit donc d'un problème de thermique stationnaire.

On considère ici que le fluide caloporteur est de l'eau. Pour que cette eau reste liquide à 300°C , il faut lui imposer une pression de 155 bars (circuit primaire). On simulera cette pression imposée sur l'eau dans un second temps, lors d'une étude structurale statique, dans laquelle on prendra également en compte les contraintes mécaniques qui s'applique sur la gaine du combustible, liées à sa dilatation. On couplera pour cela les deux études (thermique et structurale) et on procédera donc à une analyse thermo-mécanique.

1ère partie : calcul de thermique stationnaire :

- Géométrie : nous allons procéder ici à une analyse 2D, en créant dans un premier temps un premier assemblage combustible - gaine (deux corps distincts).
- Matériaux : créer UO_2 , Zircalloy et ajouter Eau et assignez-les au combustible, à la gaine, et l'eau dans l'enceinte.
- Interfaces : on va imposer une résistance de contact entre le combustible et la gaine. Dans l'onglet Connexions, déroulez les propriétés des différentes connections et imposez une résistance de contact aux interfaces combustible / gaine, équivalente à $1.5 \text{ K.cm}^2.\text{W}^{-1}$ (le logiciel propose de fixer la valeur de la conductance thermique de l'interface).
- Maillage : on va générer un maillage, en s'assurant d'un maillage régulier, suffisamment fin, et en imposant un certain nombre d'éléments dans l'épaisseur de la gaine.
- CAL : on considère que la température du fluide caloporteur est de 300°C . On va donc considérer qu'il s'agit là de la température initiale du système, et donc définir une température initiale uniforme de 300°C pour l'ensemble du système.
- Chargement : la chaleur est générée par l'uranium. On va imposer un chargement de type source de chaleur interne, de puissance $0,2 \text{ W/mm}^3$. Le fluide caloporteur est maintenu à une température de 300°C (condition de température). La chaleur générée va diffuser dans le fluide caloporteur par ses surfaces externes des gaines du combustible, via un phénomène de convection forcée (débit du fluide de 0.32 kg.s^{-1}). On va donc appliquer un chargement en convection sur les surfaces externes des gaines (cliquez droit > Insérer > Convection). On estime la valeur du coefficient de convection avec le fluide en mouvement à $36000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

- Résultats : visualisez la répartition des températures et les flux thermiques dans le système.

2nde partie : analyse thermo-mécanique stationnaire :

On va maintenant prendre en compte la pression appliquée sur l'eau (qui se répercute sur la gaine de combustible) et la dilatation thermique de la gaine, au travers d'une analyse thermo-mécanique (couplage d'une étude thermique et structurale). Compte tenu qu'on applique ici uniquement un chargement thermique non dépendant du temps, on procèdera à une analyse structurale statique.

Les deux analyses partagent la même géométrie, le même maillage et le même matériau ; par contre, les conditions aux limites et les chargements appliqués dans chacune seront différents. La distribution de chaleur calculée au cours de l'analyse thermique va constituer une donnée d'entrée de chargement de l'analyse structurale, puisque le système est considéré comme soumis à aucune contrainte. On va donc couplés les cases A2 à A4 directement (géométrie, matériaux, maillage), et A6 (Solution) de l'analyse thermique à A5 (Configuration) de l'analyse structurale.

- Matériaux : les matériaux UO_2 et Zircaloy ne comportent pas de données mécaniques, nécessaires pour le calcul des déplacements. Revenez à la bibliothèque des matériaux et ajoutez à l' UO_2 et au Zircaloy des données d'élasticité isotrope (boîte à outils > linéaire élastique > élasticité isotrope, à jouter dans la case Variables des champs

matériaux). Le module d'élasticité de l'uranium est de 208 GPa, celui du Zircaloy estimé à 107 GPa, les coefficients de Poisson des deux matériaux seront fixés à 0.3 par défaut). Mettez à jour votre projet. NE PAS OUBLIER LES CTE

- CAL : aucune condition n'est appliquée. Veillez cependant à activer les ressorts de faible raideur dans les conditions d'analyse.

- Chargement : le chargement est défini par la distribution de températures qui a été calculée lors de l'analyse thermique préalable. Ce chargement a d'ores et déjà été implémenté dans l'analyse structurale via le couplage réalisé, ce qu'on peut voir dans l'arbre dans l'onglet Structural statique > Chargement importé (Solution). Il nous reste maintenant à « activer » ce chargement : pour cela, cliquez droit dans l'onglet Chargement importé > Importer le chargement. On ajoute la pression exercée par l'eau à la surface de la gaine, de 155 bars.

- Résultats : on déterminera les contraintes et les déformations qui se développent dans les gaines de zircone, du fait de la température du combustible et de la pression exercée par le fluide caloporteur.

1.3. 3. Mise en application 3 – Analyses thermique stationnaire et transitoire, et analyse thermo-mécanique

On se propose d'étudier la distribution de température d'un circuit imprimé comportant différents composants, qui produisent de la chaleur pendant leur fonctionnement (voir figure 2 ci-dessous). Le microprocesseur est considéré comme restant sous tension tant qu'un courant est appliqué au circuit, alors que les deux autres puces sont activées et désactivées de façon périodique, à différents temps et pour différentes durées. On étudiera également les déformations et contraintes qui se développent dans l'assemblage à cause des changements de température.

L'ensemble du circuit imprimé interagit par convection avec l'air ambiant, qui est maintenu à une température constante de 22°C.

Le microprocesseur qui est sous tension en permanence conduit à un chargement par génération interne de chaleur de l'ordre de $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ W.mm}^{-3}$. Une puce (n°1) est alimentée à partir de la 20ème seconde de fonctionnement du circuit imprimé, et pour une durée de 20 secondes. Pendant ce temps, elle développe une génération interne de chaleur de $5 \cdot 10^{-2} \text{ W.mm}^{-3}$. La dernière puce (n°2) est alimentée entre la 60ème et la 70ème seconde de fonctionnement du circuit imprimé, et elle développe pendant cette période une génération interne de chaleur de $0,1 \text{ W.mm}^{-3}$.

On procédera à une analyse de la température du circuit sur une durée de 200 secondes.

Le circuit imprimé est en FR4 (polymère type époxy renforcé par des fibres de verre), la batterie est en lithium, le microprocesseur est en silicium, et pour des raisons de simplicité, les autres composants sont considérés en aluminium. Les caractéristiques thermiques sont les suivantes :

Matériau	FR4	Li	Si	Al
Densité (g.cm ⁻³)	1.80	0.53	2.33	2.70
Conductivité k (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0.30	84.7	148	224
Capacité calorifique Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	800	23.6	712	951
Module d'Young (GPa)	Orthotrope	11	165	71
CTE (10 ⁻⁶ /°C)	Orthotrope	12	2,6	23
Coefficient de poisson	Orthotrope	0,36	0,42	0,33

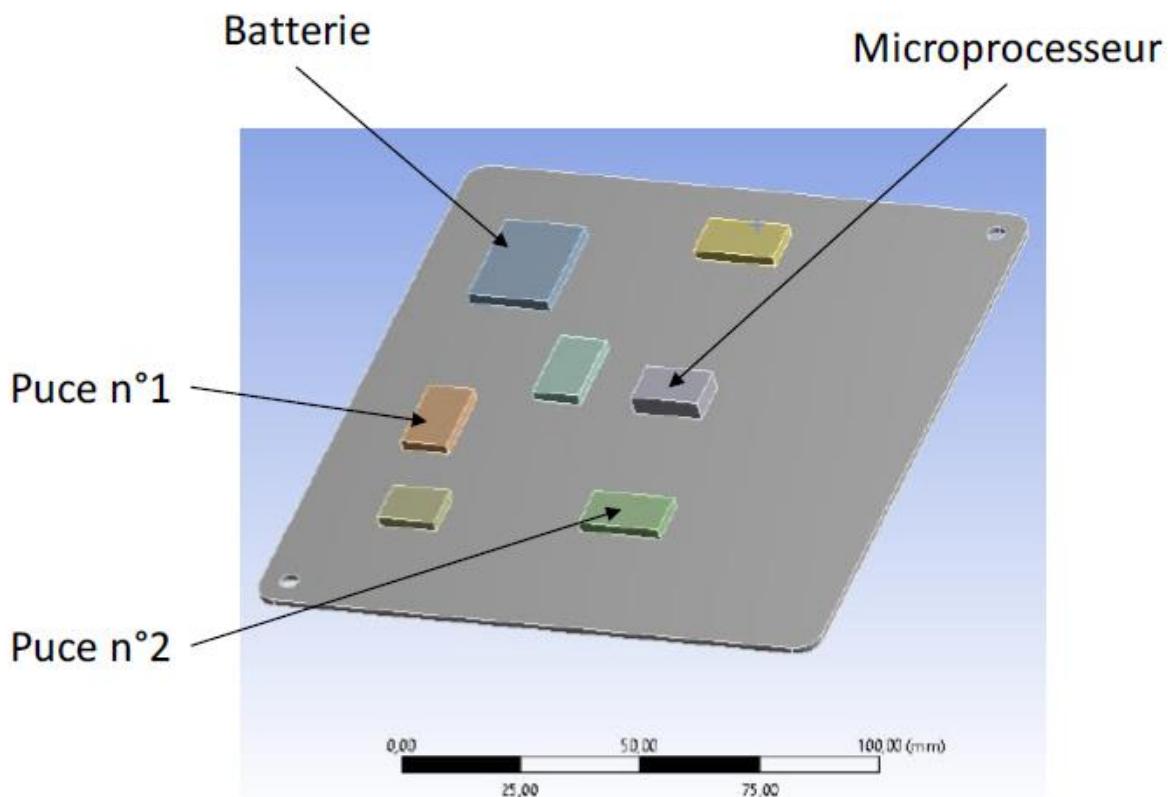


Figure 2 : schéma du circuit imprimé

On vous demande ici d'étudier la distribution de température d'un circuit imprimé comportant différents composants, qui produisent de la chaleur pendant leur fonctionnement, mais ne fonctionnent pas en même temps.

Vous déterminerez les contraintes et déformations générées dans le système, liées à la distribution de température et au fait que la dilation des composants ne soit pas libre (les composants sont soudés au PCB). Cependant, pour des raisons de simplicité de calcul, on ne déterminera que les contraintes thermo-mécaniques générées par l'échauffement du microprocesseur (analyse thermique statique, couplée à une analyse structurale statique).

On vous demande ici d'étudier la distribution de température d'un circuit imprimé comportant différents composants, qui produisent de la chaleur pendant leur fonctionnement, mais ne fonctionnent pas en même temps : le microprocesseur fonctionne en permanence, alors que deux autres ne fonctionnent que par intermittente. Une analyse en mode transitoire seront donc nécessaires pour étudier les températures résultant du chauffage développé par chacune des puces.

Les contraintes et déformations thermo-mécaniques engendrées par l'échauffement du microprocesseur seront déterminées grâce à une étude de structure statique. Les résultats de l'analyse thermique transitoire constituent le chargement imposé à la structure, tout en fixant les conditions initiales de température du système.

Pour cela, au démarrage du Workbench, sélectionnez tout d'abord une analyse thermique transitoire comme projet, puis cliquez dans la fenêtre Boîte à outils sur une analyse structurale statique, et faites glisser cet item jusqu'à la case solution de la première analyse. Les connections entre les analyses vont se réaliser toutes seules.

- Géométrie et maillage : compte tenu de la géométrie du modèle, on va procéder ici à une analyse 3D. Les deux analyses partageant la même géométrie, on va l'insérer dans la première analyse (stationnaire) : commencez par ouvrir cette analyse (double clique dans Géométrie), puis importez la géométrie de la puce, fournie dans le fichier *BoardWithChips.x_t*.

Procédez ensuite au maillage de l'assemblage, en utilisant des éléments 3D héxaèdriques. Et pour bien prendre en compte la distribution de chaleur aux interfaces circuits/composants, tout en limitant les ressources de calcul utilisées, le circuit imprimé sera maillé de façon assez grossière, les composants supportés plus finement.

- Propriétés des matériaux : on va ajouter les matériaux nécessaires : FR4, lithium, silicium et aluminium dans la bibliothèque matériaux du Workbench avec les caractéristiques données dans l'énoncé du TP, et assigner ensuite ces matériaux aux différents composants. FR4 est trouvable dans les matériaux généraux, il faudra créer les autres.

- CAL : on va fixer ici la température initiale du système. On va considérer que le système fonctionne à température ambiante, à l'air, dans un environnement non clos. La température ambiante est fixée ici à 22°C.

- Chargement : on commence par appliquer le chargement créé par le microprocesseur, sous forme d'une génération interne de chaleur, avec une valeur de $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ W.mm}^{-3}$.

Ensuite on va appliquer le chargement créé par les puces alimentées sur des temps déterminés. On va commencer par renseigner la durée de l'analyse à mener : on se fixe une durée de 200s pour bien visualiser les effets de l'activation de chaque puce de la carte. Pour cela, cliquez dans l'onglet Configuration de l'analyse transitoire, et dans la boîte de dialogue, dans Contrôle des étapes > Temps final = 200s. On va ensuite spécifier un pas de temps initial de 0.01s, avec une valeur minimale de 0.001s et une valeur maximale de 0.25s.

On utilise ici un pas de temps très court pour permettre une bonne convergence du calcul : en effet, on considère ici le cas de puces émettant sur des périodes très courtes (quelques dizaines de secondes), avec une montée en puissance quasi-instantanée (0.1 s), ce qui implique des changements très rapides au niveau du chargement, qui ne peuvent être bien considérés qu'en utilisant des incrémentations de temps pour le calcul eux aussi très courts.

On définira dans un premier temps la génération de chaleur de la puce qui est alimentée entre la 20ème et la 40ème seconde : sélectionnez la puce considérée, puis cliquez droit > Insérer > Génération interne de chaleur, et dans les Détails du chargement, on va spécifier qu'il s'agit d'un chargement variant dans le temps, en entrant un tableau de données de la forme, soit dans le tableau qui apparaît : temps $t=0$ s, chargement (génération interne de chaleur) = 0 ; à $t = 20$ s, chargement = 0 ; à $t = 20.1$ s, chargement = $5 \cdot 10^{-2} \text{ W.mm}^{-3}$; à $t = 40$ s, chargement = $5 \cdot 10^{-2} \text{ W.mm}^{-3}$; à $t = 40.1$ s, chargement = 0.

On procédera de la même façon pour la puce N°2, alimentée entre la 60ème et la 70ème seconde, par une génération de chaleur interne de $3 \cdot 10^{-2} \text{ W.mm}^{-3}$.

Cette chaleur va se disperser à la fois dans le circuit imprimé par conduction, dans l'environnement par convection avec l'air ambiant et grâce à un radiateur que l'on ne modélisera pas. On va donc imposer une convection pour toutes les surfaces des puces en considérant un coefficient de transfert thermique avec le radiateur à 22°C de $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ W.mm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, et pour le reste des surfaces du circuit imprimé et des puces, de $5 \cdot 10^{-6} \text{ W.mm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

- Analyse : on réalise une analyse thermique en mode transitoire. L'analyse a déjà été configurée à l'étape précédente, sur une durée à 200s. On demandera par ailleurs au logiciel d'enregistrer tous les résultats pour chacun des pas de temps : dans l'onglet Configuration de l'analyse transitoire, dans la boîte de dialogue, dans Contrôle des résultats > Fichier résultats > Fréquence d'écriture = Toutes les étapes.

On visualisera la distribution de températures engendrée dans le circuit par cette puce, sous forme de contours colorés. Pour cela, dans l'onglet Solution de l'arbre du projet, cliquez droit > Insérer > Températures.

Seconde partie : étude en thermomécanique

On cherche maintenant à déterminer les déformations et les contraintes générées dans le système du fait de la distribution de températures créée, et parce que les composants ne peuvent pas se dilater librement. Pour cela, on va procéder à une analyse structurale, les résultats de l'analyse thermique constituent le chargement imposé à la structure, tout en fixant les conditions initiales de température du système. A ces conditions initiales va s'ajouter ici la condition de fixité du PCB au niveau des trous des vis, qu'on va implémenter sous forme d'une condition aux limites de support fixe (structurale).

- Matériaux : on va commencer par modifier les propriétés des matériaux, dans l'onglet Données techniques du WorkBench, pour ajouter où cela est nécessaire, les propriétés mécaniques des matériaux (propriétés élastiques isotropes et coefficient isotrope instantané de dilation thermique).

Ensuite le PCB est en FR4 qui présente un comportement mécanique orthotrope. Il convient donc d'orienter le repère local des éléments du circuit imprimé suivant les directions orthotropiques du matériau, de façon à bien capturer le comportement du PCB. Pour cela, cliquez droit sur Géométrie > Insertion > orientation des éléments, et sélectionnez le corps PCB comme géométrie sur laquelle l'orientation des éléments doit être faite. Laissez la définition comme « guide surface et arête » et sélectionnez la surface supérieure du PCB comme surface guide et une des arêtes comme arête orientée suivant X. Cliquez droit > Générer. Apparaissent alors des systèmes de coordonnées dans chacun des éléments, vérifiez leur orientation conformément aux propriétés du FR4.

- CAL : en plus de la température initiale du système (température pour laquelle les contraintes et déformation des différents composants sont nulles), qui a été implémentée via l'analyse thermique préalable à 22°C, on va appliquer une condition de support cylindrique (qui applique une contrainte de compression sur une surface cylindrique suivant sa normale) au niveau de la surface cylindrique interne des trous de vis du PCB. Définissez les déplacements radiaux et axiaux à fixe et le déplacement tangentiel à libre.

- Chargement : le chargement est défini par la distribution de températures qui a été calculée lors de l'analyse thermique préalable. Ce chargement a d'ores et déjà été implémenté dans l'analyse structurale via le couplage réalisé, ce qu'on peut voir dans l'arbre dans l'onglet Structural statique > Chargement importé (Solution) ; vous pouvez double-cliquer sur cet onglet, s'ouvre alors une fenêtre Température du corps importée présentant tous les paramètres de l'importation. Appliquer tout sur temps de la source. Il nous reste maintenant à « activer » ce chargement : pour cela, cliquez droit dans l'onglet Chargement importé > Importer le chargement.

- Analyse : compte tenu qu'on applique ici uniquement un chargement thermique non dépendant du temps, on procèdera à une analyse structurale statique.

Dans le contrôle de l'analyse on appliquera 10 étapes de calcul à 1s, 10s, 20s, 30 s ... jusqu'à 90s. Le plus simple pour cela est encore de régler les données tabulaires.

On nous demande de déterminer les contraintes qui se développent dans les différents composants du fait que leurs soudures à la plaque, les contraignent lors de leur dilatation. Pour cela, on va demander au logiciel de déterminer les contraintes suivant X, Y et Z. On pourra également s'assurer que le chargement appliqué ne conduit pas

à une plastification des différents matériaux ; pour cela, on demandera le calcul des contraintes équivalentes de Von Mises, caractérisant l'entrée en plasticité, et la comparer avec la valeur de la limite élastique des matériaux considérés. Enfin, pour obtenir la valeur du maximum des contraintes en traction vues par la jonction, ainsi que cette même valeur en compression, on demandera à visualiser les première et troisième contraintes principales. Finalement, on pourra également visualiser les déformations subies par la jonction : clique-droit dans l'onglet Solution de l'arbre du projet > Insérer > Déformation > Déformation thermique et Totale.

- Résultats : Visualisez les déformations et les contraintes qui s'établissent dans l'assemblage pour les étapes de l'analyse. Déterminer où elles sont maximales, et si éventuellement elles conduisent à la plastification de la structure.



f
t
in

Ecole Publique d'Ingénieurs en 3 ans

6 boulevard Maréchal Juin, CS 45053
14050 CAEN cedex 04

