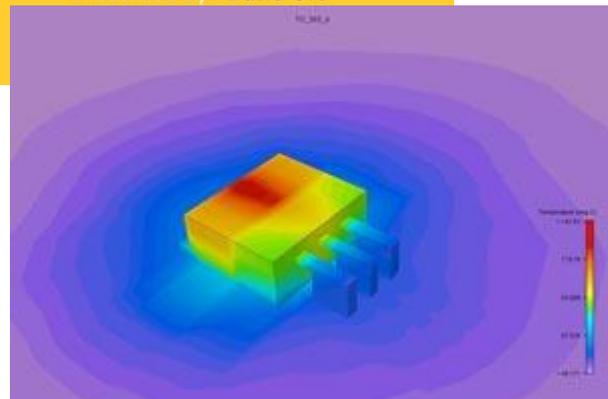
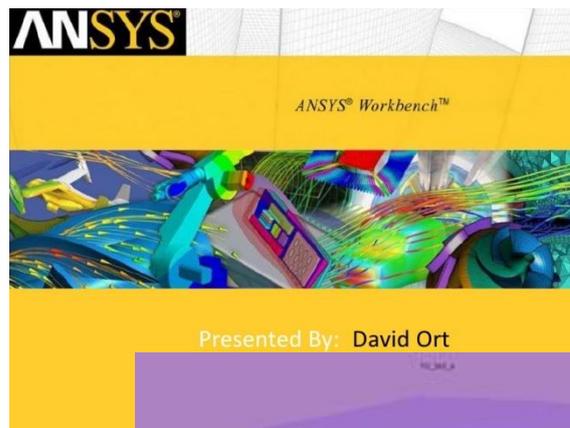
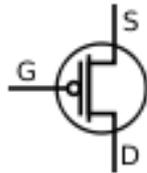
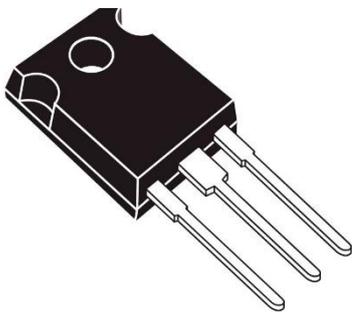


MODÉLISATION F.E.M D'UN TRANSISTOR EN PUISSANCE



Étudiants:

Mathieu VANDECASTEELE

Yiming SONG

Sébastien MENZER

Amine AIT OUAZZOU

Abel GAMA

Enseignant-responsable du projet :

Andrès ECHEVERRI

Date de remise du rapport : 10/06/2016

Référence du projet : STPI/P6/2016 – 7

Intitulé du projet : « **Modélisation F.E.M d'un transistor en puissance** »

Type de projet : **Modélisation en 3D d'un transistor en puissance à partir d'un logiciel de simulation numérique mettant en œuvre la méthode des éléments finis.**

- ➔ Mesures précises des dimensions d'une pièce à reproduire
- ➔ Prise en main du logiciel de simulation numérique
- ➔ Réalisation d'un modèle 3D par le logiciel
- ➔ Simulations

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

Etudier par une modélisation utilisant la méthode des éléments finis les déformations de la structure d'un transistor à effet de champ en puissance. Il s'agit de représenter la dynamique d'un système physique qui subit des contraintes, ici thermiques, et trouver les possibles limites.

Pour un transistor, il s'agit d'étudier les limites de température qu'il est capable de supporter sans dysfonctionnement et donc les limites de tensions électriques applicables. Le principal but est de cartographier donc les zones de déformations et la propagation de la chaleur appliquée par la tension électrique le long de la structure.

Il est aussi dans notre objectif d'apprendre, de faire une première approche d'un logiciel complexe de modélisation physique car nous serons amenés sûrement à en refaire plus tard.

Mots-clefs du projet (4 maxi) : **modélisation, éléments, finis, transistor**

TABLE DES MATIERES

1.	Introduction.....	6
2.	Méthodologie.....	7
2.1.	Les premières séances	7
2.2.	Avant de se lancer.....	7
2.3.	Répartition du travail.....	8
3.	Travail réalisé	9
3.1.	Présentation du Transistor à effet de champ TPH3205WS	9
3.1.1.	Qu'est-ce qu'un transistor ?.....	9
3.1.2.	Les Dimensions du TPH3205WS et l'élaboration de notre modèle	9
3.2.	Présentation d'ANSYS Workbench et Méthode F.E.M	10
3.2.1.	ANSYS Workbench	10
3.2.2.	Méthode des éléments finis.....	10
3.3.	Travail sur le logiciel	11
3.3.1.	La Géométrie	11
3.3.2.	Les Matériaux	13
3.3.3.	Les Liaisons et le Maillage	13
3.3.4.	Analyse Thermique Stationnaire	14
3.3.5.	Analyse Mécanique Stationnaire	14
4.	Résultats.....	16
4.1.	Observations	18
4.2.	Interprétations.....	18
4.3.	Perspective d'améliorations.....	18
5.	Conclusion.....	19
5.1.	Conclusions individuelles	19
5.2.	Conclusion générale.....	20
6.	Bibliographie.....	21
7.	Table d'illustrations.....	21
8.	Annexes (DÉBUT d'analyse transitoire).....	22
	+observations microscopiques du transistor :	24

NOTATIONS, ACRONYMES

→ FEM ou MEF = Méthode des éléments finis.

→ CAO = Conception assistée par ordinateur.

1. INTRODUCTION

En tant que futurs ingénieurs, notre formation à l'INSA de Rouen nécessite des projets de groupe qui sont des avant-goûts au final de ce futur métier car nous serons très souvent amenés à devoir mettre en synergie nos talents et collaborer pour une même œuvre.

Dans le cadre du Projet P6 en STPI2, notre groupe de travail a porté son attention sur le thème de la modélisation et la simulation numérique,

le sujet s'intitule « Modélisation F.E.M d'un transistor en puissance ».

Nous avons été encadrés par M.Echeverri et son but fut de nous introduire donc à la simulation numérique autour d'un sujet lié à la Mécatronique car c'est le transistor l'élément central de notre projet.

Il désire que l'on réalise un modèle 3D avec la méthode des éléments finis d'un transistor à effet de champ pour étudier sa structure une fois qu'on applique une tension, c'est-à-dire observer la propagation de la chaleur par conduction induite avec la tension et également les possibles déformations mécaniques.

Afin de réaliser tout cela, nous avons à disposition le logiciel ANSYS Workbench, très ressemblant à première vue à un logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) comme SolidWorks mais qui se distingue par ses capacités de simulation numérique. Cependant, la manipulation de ce logiciel était méconnue de tous les individus de notre groupe, c'est pourquoi dès le début il a fallu apprendre à nous familiariser avec son fonctionnement particulier.

Le travail s'est découpé en plusieurs étapes : dans un premier temps il fallait mesurer précisément la pièce pour établir un plan de modélisation puis ensuite modéliser et faire les simulations, toutes les directives et conseils venant de notre professeur.

Une fois que le résultat nous a semblé satisfaisant, et que M.Echeverri nous ait conseillé sur certains éléments, nous avons sorti un modèle 3D très fidèle au réel.

Ainsi dans l'optique de retracer l'ensemble de notre projet, nous allons dans ce rapport exposer notre méthodologie, puis présenter l'outil essentiel que nous avons utilisé pour réaliser cette simulation 3D avant de conclure.

2. METHODOLOGIE

2.1. Les premières séances

La première séance était essentiellement consacrée à la présentation du projet par M.Echeverri. Il nous a expliqué en détails en quoi consistait notre projet, c'est-à-dire réaliser une simulation numérique d'un transistor modélisé en 3D via un logiciel utilisant la méthode des éléments finis.

Pour voir concrètement quel serait le résultat, il nous a montré son travail personnel et ses études sur le transistor au travers de sa thèse qu'il est actuellement en train de faire valider. Nous sommes allés dans son laboratoire à la faculté en face de l'INSA, dans la section appartenant au Groupe de Physique des Matériaux.

Nous avons pu lire son propre rapport personnel sur une manipulation similaire. De manière générale, M.Echeverri fut très pédagogue sur le sujet, il nous a enseigné le fonctionnement du transistor et les différents types de transistors existants, la structure, les matériaux ou encore l'intérêt de faire ce genre de simulation en tant qu'ingénieur. La simulation ici permet d'étudier un transistor tout au long de sa vie et des différents cycles de tension qu'il subit, on va ainsi pouvoir concevoir des nouveaux transistors qui repousseront à chaque fois les limites des précédents. Nous avons pu bénéficier aussi d'observations microscopiques pour appuyer son enseignement. Il a été aussi question d'introduire notre plateforme de travail, c'est-à-dire le logiciel que nous allons utiliser : ANSYS Workbench.

Le logiciel a dû être installé spécialement pour nous sur une machine de l'INSA et nos premières séances se résument à beaucoup de tests, beaucoup de tutoriaux pour apprendre les bases et ainsi faire ce que nous voulions. Même avec des tutoriaux le logiciel est très dur à prendre en main et 6 mois de projet P6 ne suffisent pas pour en maîtriser toutes les subtilités, nous nous sommes donc équipés pour la plupart d'entre nous de copies du logiciel et nous nous sommes divisés le travail d'apprentissage.

2.2. Avant de se lancer

Avant tout, quelques préliminaires sont nécessaires pour la simulation, notamment le choix du Transistor.

M.Echeverri hésitait entre deux transistors à effet de champ, l'un avec une structure plus complexe que l'autre mais de peur de ne pas forcément sur le coup réussir à le reproduire avec le logiciel nous sommes partis sur l'autre en apparence plus simple.

Le modèle en question donc est le TPH3205WS de chez Transphorm. Il a été décidé de faire une simulation en deux parties : une partie purement thermique où on étudie la conduction et la propagation de la chaleur sous tension et une autre partie mécanique cette fois qui concerne les déformations de la structure.

Autres choses, des choix sur la modélisation se sont imposés dès le début et au cours de notre projet, il est dans un premier temps question de modéliser le transistor sans son boîtier plastique extérieur, le professeur avait découpé des TPH3205WS pour pouvoir mesurer les parties intérieures.

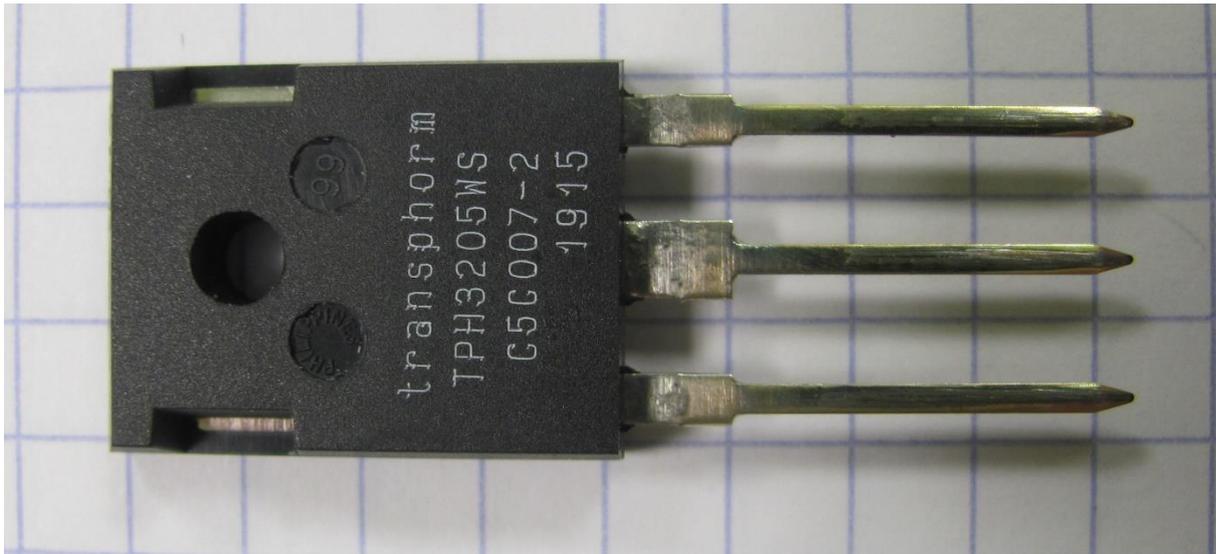


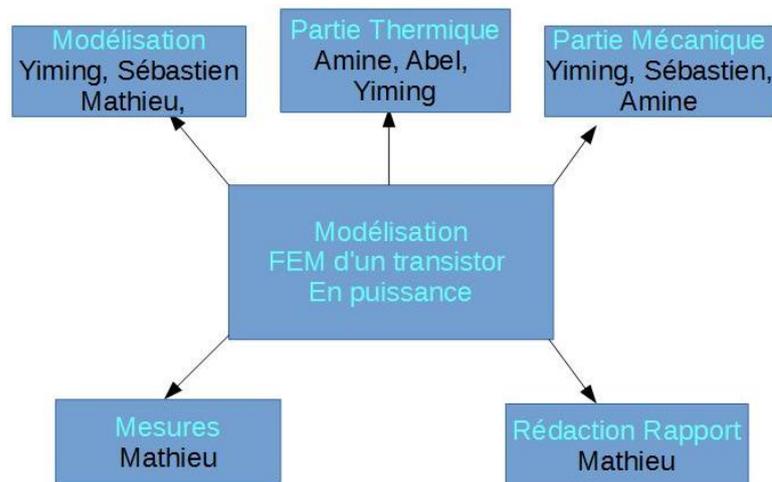
Figure 1 : Transistor TPH3205WS

2.3. Répartition du travail

Du fait de la non possibilité de travailler sur le logiciel ANSYS a domicile pour trois d'entre nous, nous devons procéder a une répartition du travail à la fois équitable et surtout nous permettant la réalisation du projet dans les délais.

Durant les premières séances, il s'agissait essentiellement de la prise en main du logiciel et de ses différentes fonctionnalités mais les suivantes devaient être efficaces car nous n'avions pas beaucoup de temps au final.

La répartition, effectuée après les consignes préliminaires de M.Echeverri, peut se représenter de la façon suivante :



Cependant, chacun a suivi de près ce que faisait l'autre et on s'est retrouvé la plupart du temps à travailler ensemble lors des séances de TDs sur le logiciel avec l'aide de notre professeur. Globalement c'est un travail de synergie car il a fallu les talents réunis de tout le monde pour comprendre le logiciel car c'est de loin la principale difficulté rencontrée tout au long du projet.

3. TRAVAIL REALISE

3.1. Présentation du Transistor à effet de champ TPH3205WS

3.1.1. Qu'est-ce qu'un transistor ?

Le **transistor** ou « résistance variable de transconductance" est un composant fondamental en électronique à trois électrodes d'entrées et de sorties. Ses utilisations sont nombreuses, principalement comme interrupteur commandé dans les circuits logiques (un interrupteur sans parties mécaniques) ou encore pour ses capacités d'amplification de courant et de stabilisation de tension.

On distingue deux grandes familles de transistors :

- les **transistors bipolaires**, qui sont des amplificateurs de courant utilisés en analogique et en électronique de puissance
- les **transistors à effet de champ** qui représentent 90% des transistors des circuits complexes (comme ceux des microprocesseurs).

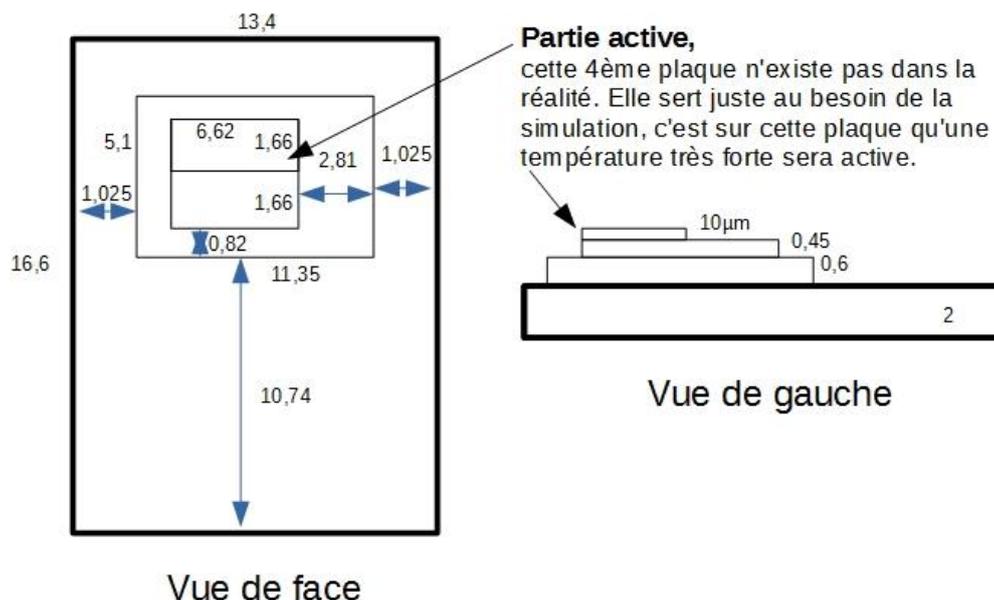


Figure 2 : Transistor à effet de champ

Le TPH3205WS est à effet de champ.

3.1.2. Les dimensions du TPH3205WS et l'élaboration de notre modèle

À l'aide d'une règle à coulisse à affichage digitale, nous avons mesuré (en mm) les parties découpées de transistor sans le boîtier au centième de millimètre près. Il en résulte le schéma suivant, attention il n'est pas à l'échelle :



Ceci fait, il est possible de modéliser de la manière la plus fidèle possible le transistor dans ANSYS.

Par rapport à la réalité, comme il est dit sur le schéma, la 4^{ème} plaque de 10 μm n'existe pas et c'est les restrictions du logiciel qui imposent de créer un modèle avec une microcouche en plus. Tout le long de notre projet nous avons enrichi ou modifié notre modèle en fonction des contextes.



Figure 3 : Transistor en coupe

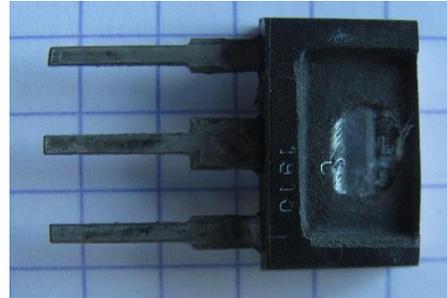


Figure 4 : Transistor en coupe, on remarque la plaque de silicium

3.2. Présentation d'ANSYS Workbench et Méthode F.E.M

3.2.1. ANSYS Workbench

ANSYS Incorporation est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique. Ses produits majeurs sont des logiciels qui mettent en œuvre la méthode des éléments finis afin de créer des modèles. Workbench est la toute dernière interface de leur outil ANSYS Multiphysics qui est lui-même un rassemblement de tous les outils précédemment sortis et qui possède toutes leurs fonctionnalités à chaque fois remises aux goûts du jour.

Les capacités du logiciel sont nombreuses : l'analyse statique, modale, harmonique, temporelle, des fluides, thermique et beaucoup d'autres...

Workbench ne possède pas seulement Multiphysics, il est aussi équipé de DesignModeler, un logiciel spécialisé dans la modélisation 3D. Auparavant les versions d'ANSYS ne comportaient pas de programmes spécialisés pour la 3D et donc leur interface était très austère. Pour revenir à notre transistor, nous avons donc utilisé DesignModeler pour le modèle 3D et Mechanical (Multiphysics) pour l'analyse.

3.2.2. Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (MEF) est une méthode d'approximation numérique de solutions de problèmes aux limites statiques ou dynamiques tels que la diffusion thermique, la mécanique des milieux continus ou encore l'électromagnétisme.

Il s'agit de trouver une approximation discrète. Pour faire bref, d'un problème différentiel aux limites linéaires, on trouve une formulation variationnelle associée équivalente, dont on calcule une approximation de la solution en projetant sur un espace de dimension finie, ce qui revient à résoudre au final un système linéaire. L'appellation éléments finis vient de la décomposition du domaine d'étude en éléments : ils sont souvent représentés par un maillage.

Dans la modélisation de notre transistor, plus le maillage sera précis et plus les déformations/résultats seront précis.

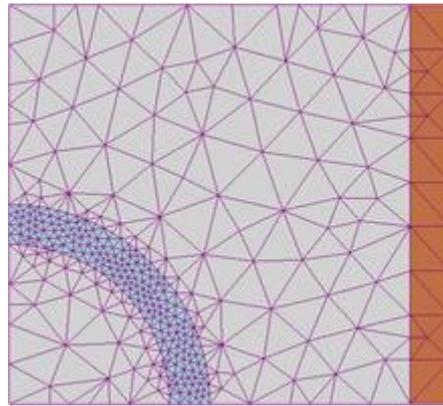


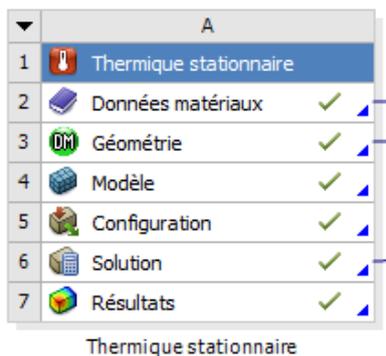
Figure 5 : Maillage d'une surface

3.3. Travail sur le logiciel

3.3.1. La Géométrie

La création du modèle 3D et le début de notre travail repose sur la paramétrisation de la géométrie de notre transistor.

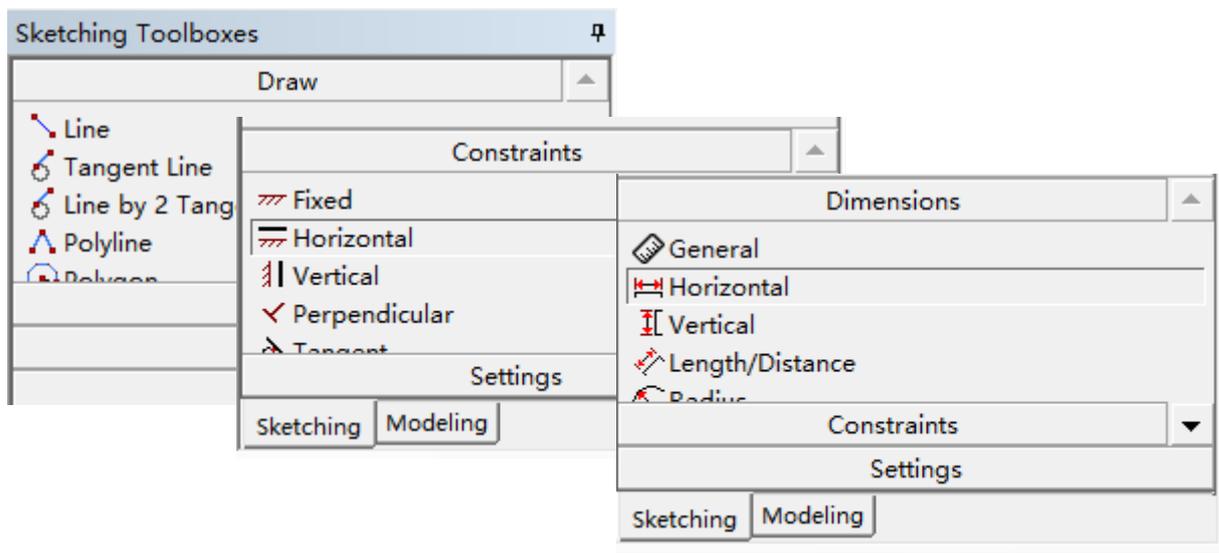
Nous voulons comme modèle un transistor composé de 4 plaques.



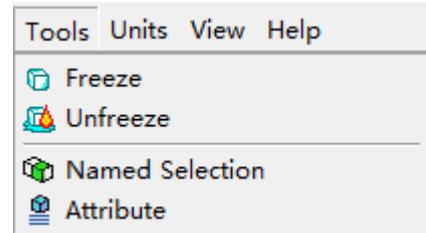
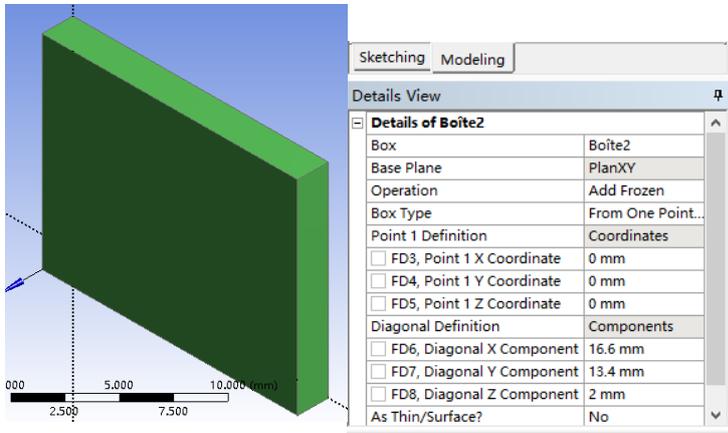
Pour ce faire dans le menu d'ANSYS Workbench nous avons choisis une machine « thermique stationnaire » car nous voulons dans un premier temps étudier la résistance du transistor soumis à une élévation de température. On double click sur le sous menu géométrie pour pouvoir ouvrir le DesignModeler et commencer la modélisation 3D.



Pour la première grande plaque de cuivre on a défini un « sketch » horizontal et vertical puis des contraintes horizontales et verticales aussi pour définir des axes et une zone de travail.

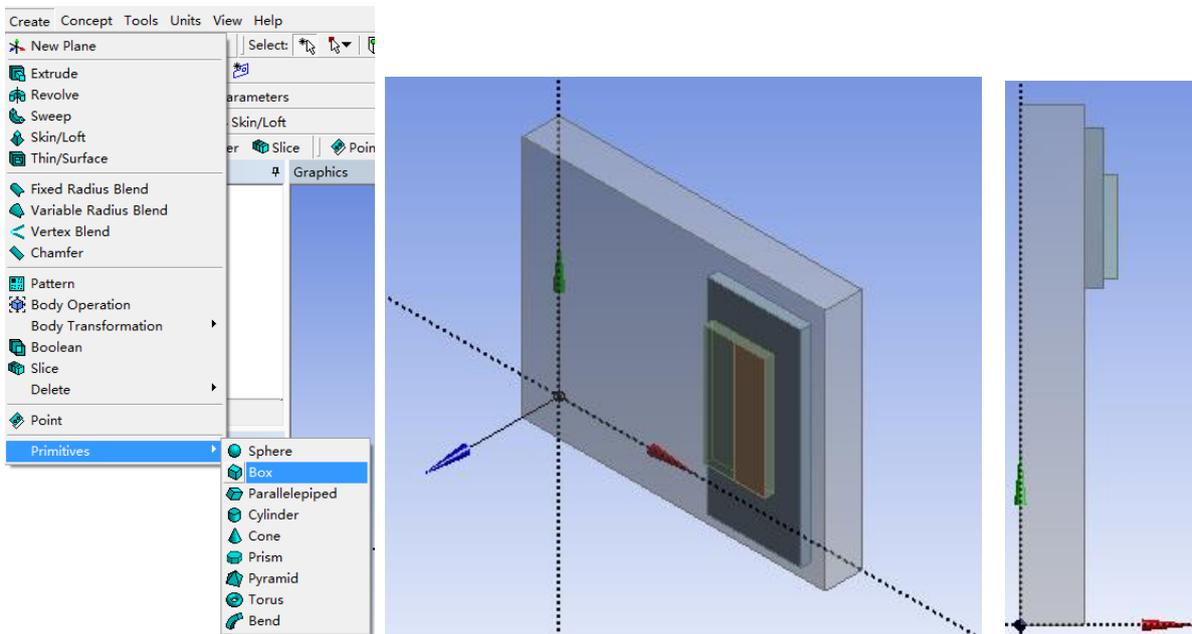


On paramètre les dimensions avant de « Freeze ». Il est important de faire cela sinon on prend le risque que le logiciel considère à la fin les quatre plaques comme un seul et même bloc/objet.



Notons aussi que le logiciel n'effectue pas les changements en temps réel, il est nécessaire de cliquer sur « Generate » à chaque modification faite pour que ce dernier calcule et affiche le nouvel état de la création.

Pour créer une seconde plaque, on se dirige dans le sous-menu « Créer » et on choisit « Box », et on répète le dimensionnement et le Freeze jusqu'à obtenir et placer correctement nos quatre plaques. A la fin nous avons donc quatre solides indépendants de créés et bien positionnés dans l'espace.



3.3.2. Les Matériaux

Une fois la géométrie fini, on revient dans le menu principal du logiciel puis cette fois nous nous intéressons au sous-menu « matériaux ». Ce dernier nous permet de renseigner au logiciel les matériaux que nous souhaitons utilisés pour le modèle.

	A	B	C	D
1	Data Source	Location		Description
2	★ Favorites			Quick access list and default items
3	General Materials	<input type="checkbox"/>		General use material samples for use in various analyses.
4	General Non-linear Materials	<input type="checkbox"/>		General use material samples for use in non-linear analyses.
5	Explicit Materials	<input type="checkbox"/>		Material samples for use in an explicit analysis.
6	Hyperelastic Materials	<input type="checkbox"/>		Material stress-strain data samples for curve fitting.
7	Magnetic B-H Curves	<input type="checkbox"/>		B-H Curve samples specific for use in a magnetic analysis.
8	Thermal Materials	<input type="checkbox"/>		Material samples specific for use in a thermal analysis.
9	Fluid Materials	<input type="checkbox"/>		Material samples specific for use in a fluid analysis.
*	Click here to add a new library			

En effet le logiciel possède une très large base de données et adaptera tous les futurs calculs en fonction des matériaux choisis.

Les deux plus grandes plaques sont en cuivre et les deux dernières apparentées à la puce sont en silicium. Nous avons choisi le cuivre pour la deuxième plaque en partant de la plus grande car le logiciel cependant ne propose pas le GaN, élément constituant cette plaque dans la réalité. On en vient donc à modifier légèrement notre modèle mais les changements seront moindres.

3.3.3. Les liaisons et le maillage

On a ensuite dû s'intéresser aux liaisons entre nos quatre plaques, direction « Modèle » dans le menu principal qui ouvre l'outil Mechanical Multiphysics d'ANSYS.

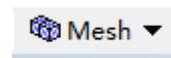
En effet, à ce stade, toutes les pièces sont encore indépendantes, il a donc fallut les fixer entre elles. Le logiciel fait des connexions de base simplistes et ne sont pas adaptées pour la simulation et ne correspondent pas à la réalité.

Le TPH3205WS voit ses plaques liées par des brasures, hors le logiciel ne propose pas ce système de liaisons donc une nouvelle fois on choisit de se détourner encore une fois un peu de cette réalité en modifiant le modèle par l'option de liaisons « Liés totalement ».

On peut dire que la modélisation 3D est presque terminée

Pour terminer le modèle avant de passer aux analyses, il est essentiel d'effectuer un maillage. Le maillage est calculé selon la méthode des éléments finis et son intérêt est capital car la précision de nos résultats dépend de la qualité du maillage !

Le maillage consiste en la subdivision et la découpe de solides en de nombreux solides plus petits. C'est comparable à un échantillonnage où à la « résolution » d'affichage.



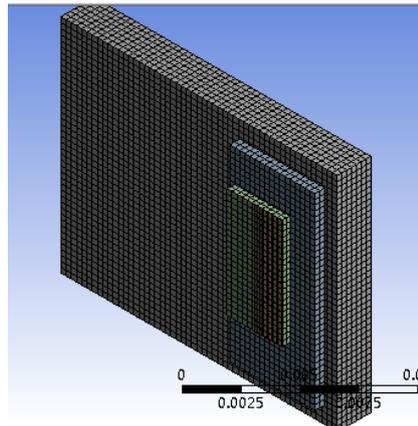
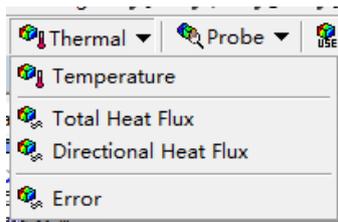


Figure 6 : Maillage du modèle

3.3.4. Analyse Thermique Stationnaire

Le modèle étant terminé, on configure alors la machine Thermique Stationnaire.

Dans un premier temps on choisit un mode de propagation de la chaleur par conduction, correspondant à une propagation sans déplacement de matière.



Il est essentiel de fixer une température ambiante, pour cela nous choisissons 22°C.

Definition	
Initial Temperature	Uniform Temperature
Initial Temperature Value	22. °C

Ensuite nous fixons deux autres températures : 22°C pour la grande plaque de cuivre et 200°C pour la

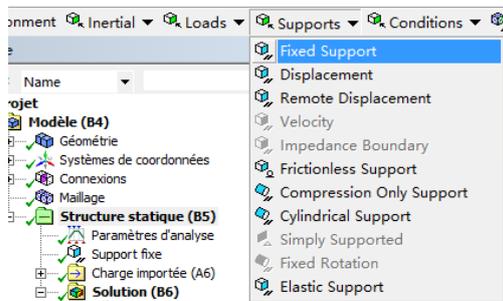
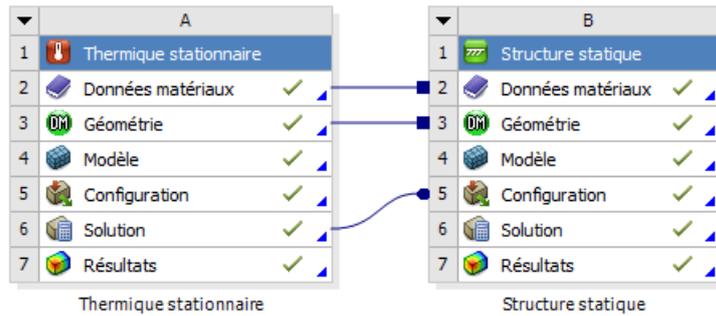
plaque représentant la partie active. Avec la conduction on va pouvoir observer la transition entre ces deux extrêmes de température.

Le logiciel fait les calculs et nous affiche les résultats.

3.3.5. Analyse Mécanique Stationnaire

On termine avec l'analyse mécanique.

On crée une nouvelle machine « Statique Stationnaire » dans le menu principal, on importe le modèle créé et son maillage.



Pour l'analyse il est nécessaire de fixer un support pour donner une référence au logiciel, on choisit la face du bas de la grande plaque de cuivre.

On stipule que l'on souhaite des déformations suivant le critère de Von Mises :

Parenthèse :

Critère de Von Mises ou critère de l'énergie de distorsion élastique :

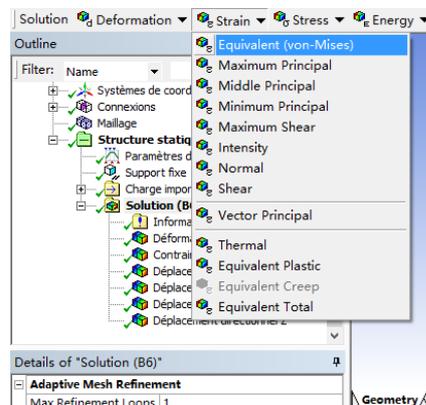
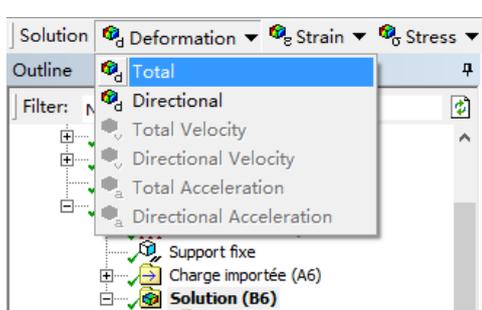
$$U = U_v + U_f = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \epsilon_{ij}$$

U_v = énergie due au changement de volume sans changement de forme

$$U_v = \frac{1}{2} \text{tr}(\sigma' \epsilon')$$

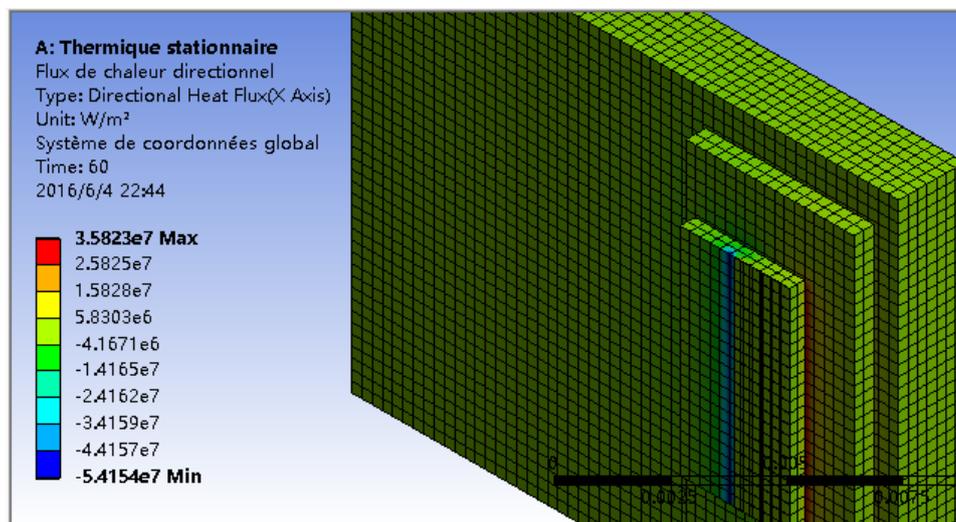
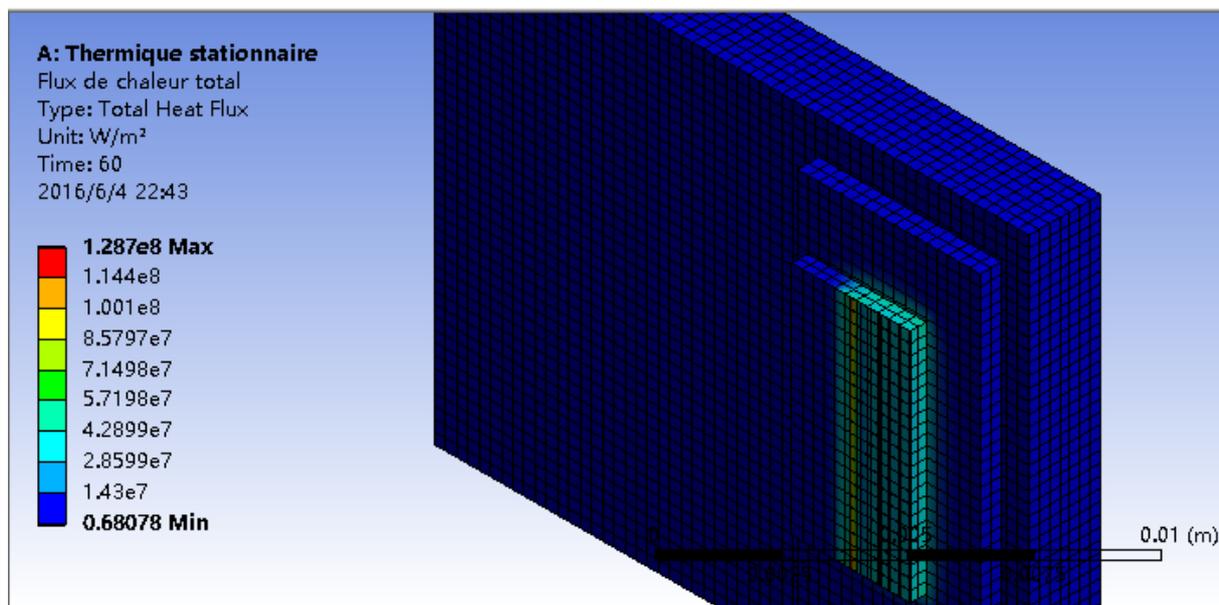
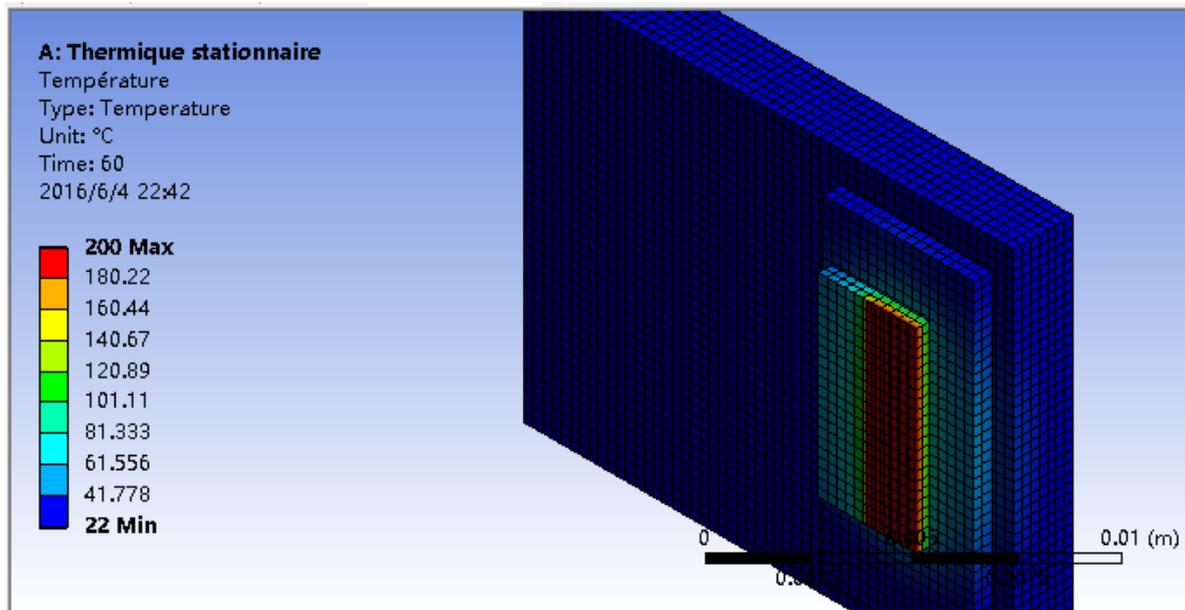
U_f = énergie due au changement de forme sans changement de volume, ou énergie de distorsion élastique

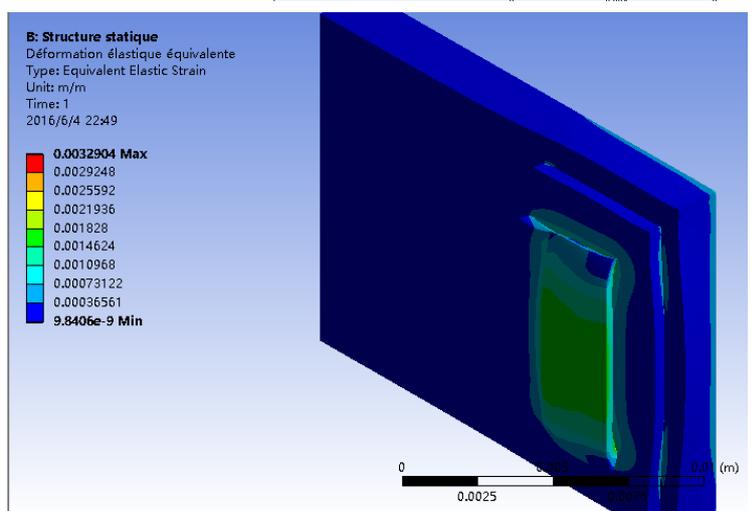
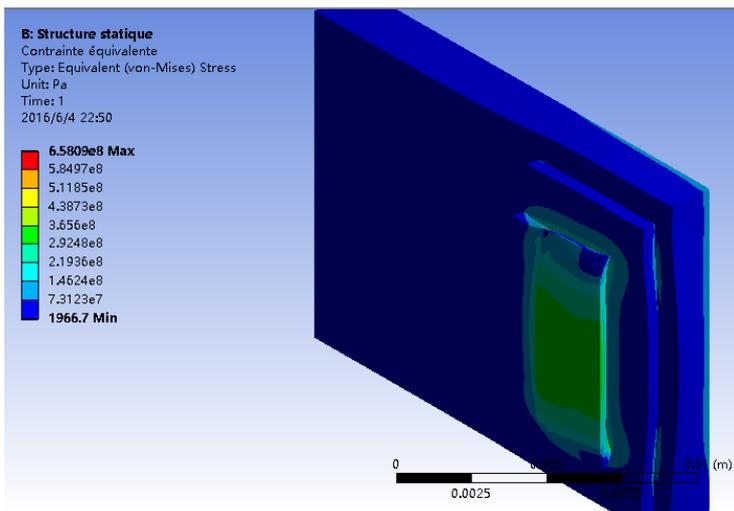
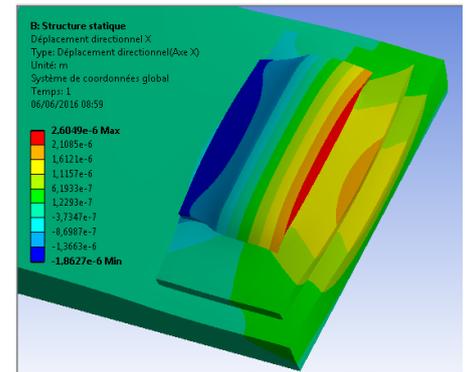
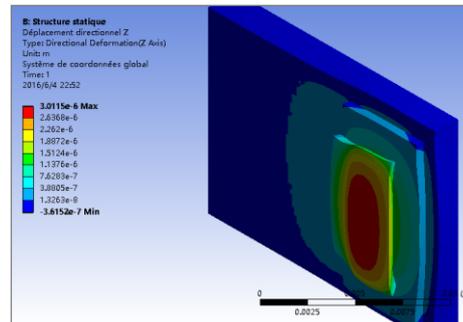
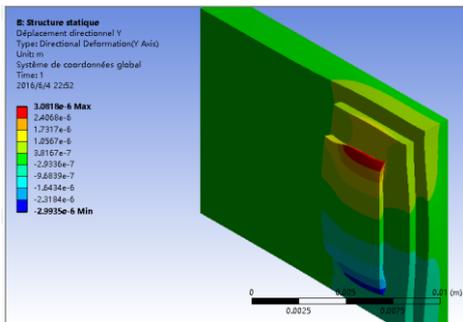
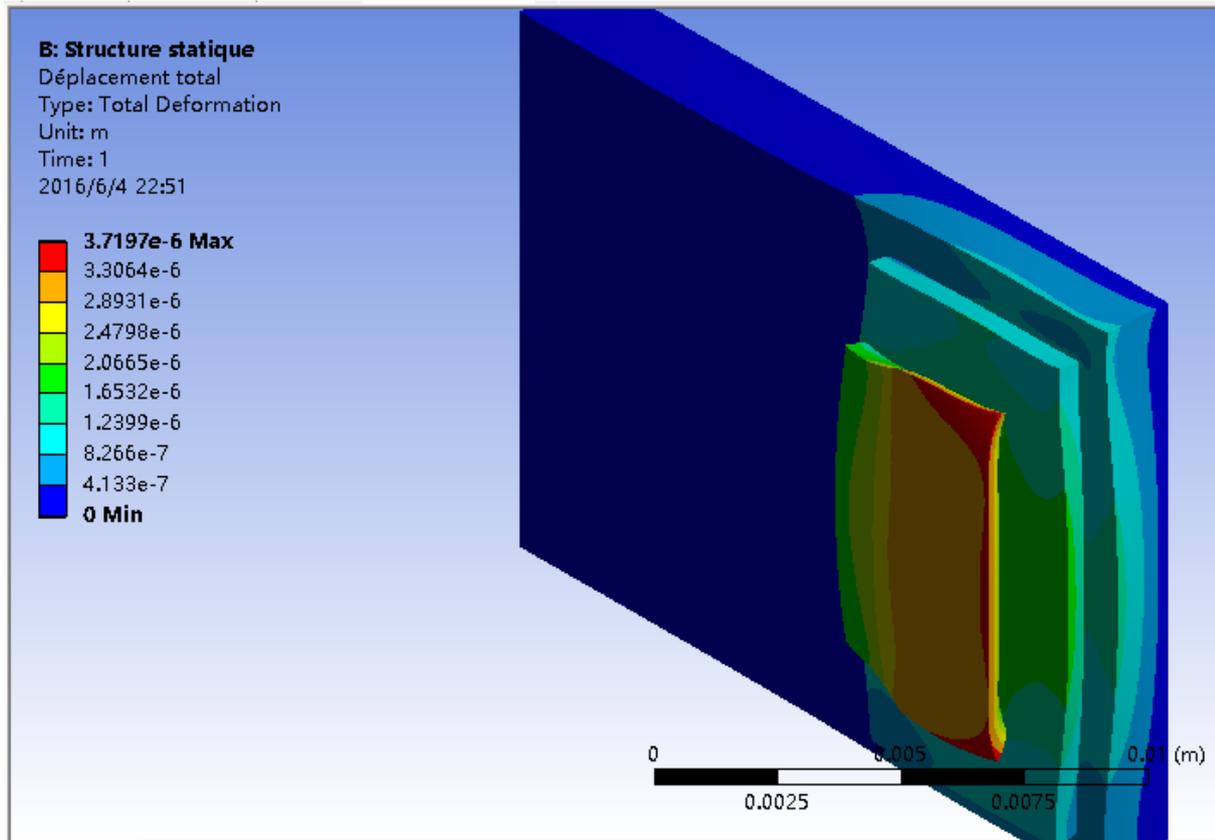
$$U_f = \frac{1}{2} \text{tr}(\sigma'' \epsilon'')$$



Ainsi nous obtenons donc les résultats des déformations, ces dernières sont très grossières sur le logiciel et ne correspondent pas à la réalité pour être visibles à l'œil.

4. RÉSULTATS





4.1. Observations :

Partie thermique : Toutes les plaques présentes plus ou moins une augmentation de leur propre température. Le flux de chaleur et la température sont bien évidemment de moins en moins intenses au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la partie active.

La plaque de silicium est particulièrement touchée et atteint une moyenne de 120°C à proximité de la partie active jusqu'à 60°C en moyenne pour le reste de la plaque.

Par conduction, les deux plaques de cuivre sont touchées aussi par la hausse de température :

- de 20 à 80°C pour la deuxième plaque de cuivre
- de 20 à 40°C pour la grande plaque de cuivre

Les observations sont semblables pour le flux de chaleur, la partie rouge sur le flux directionnel montre bien la conduction entre les deux plaques.

Partie mécanique : Les déformations sont très importantes au niveau de la plaque de silicium, plus particulièrement les coins de cette plaque où le déplacement total est beaucoup plus élevé qu'ailleurs.

On remarque sur la cartographie des contraintes que ces dernières sont présentes particulièrement sur la surface et le milieu des arêtes de la plaque de silicium.

4.2. Interprétations

La chaleur créée par effet joule lors de la mise en tension impose une forte contrainte sur les plaques, plus particulièrement sur la plaque de silicium.

Ces contraintes entraînent une dilatation générale de la pièce. Cependant les coins apparaissent comme la partie la plus fragile de la pièce donc si un problème de détérioration survient, il y a de fortes chances que cela concerne les coins d'après la simulation.

La grande majorité des déformations relèvent du domaine élastique donc elles sont non-permanentes en fonctionnement normal du transistor. Mais un transistor n'a pas une durée de vie infinie donc il persiste des déformations plastiques très légères qui au fur et à mesure avec le temps causeront le dysfonctionnement, avec de fortes chances en premier par l'intermédiaire des coins de la puce.

4.3. Perspective d'améliorations

Nous pourrions faire une étude cette fois-ci en fonction du temps, c'est-à-dire une étude Statique Transitoire et une étude Thermique Transitoire.

Nous pourrions déterminer précisément à quels moments précis certaines déformations auraient lieu et on pourrait exploiter des courbes de résultats que le logiciel créerait. Nous pourrions évaluer le transistor sur une accumulation de cycles de fonctionnement et ainsi une simulation plus précise pourrait permettre plus précisément de définir les améliorations à apporter aux futurs nouveaux transistors. Nous avons commencé cette analyse mais cependant elle n'est pas finie : voir en Annexe ce qui a été réalisé.

5. CONCLUSION

5.1. Conclusions individuelles

Sébastien Menzer

Tout au long de ce projet de P6, j'ai pu apprendre dans un premier temps à comprendre plus en détails le fonctionnement d'un transistor et son utilité, mais aussi son comportement lors de son utilisation en termes de résistance et de déformation. Il m'a aussi fait découvrir un nouveau logiciel de modélisation ce qui m'a permis de le comparer à d'autre logiciel utilisé à l'INSA comme Solidworks et de voir les avantages et les possibilités de chacun. En plus de ces connaissances techniques, ce projet est aussi une nouvelle expérience de groupe ce qui m'a donc permis d'améliorer mon aisance au sein d'un groupe, ce qui est nécessaire au métier d'ingénieur.

Mathieu Vandecasteele

Pour ma part, ce projet m'a permis une fois de plus de développer des qualités de travail en groupe et donc d'organisation. Il m'a permis aussi de découvrir un peu plus le monde de l'industrie, particulièrement celui de la simulation numérique. J'ai apprécié travailler sur ce nouvel outil et il fut bon pour moi de toucher une première fois à ce dernier.

Travailler en synergie avec un groupe est toujours autant passionnant par le défi qu'il impose et c'est toujours très formateur pour la future carrière d'ingénieur.

Yiming Song

Plus tard j'aimerais être dans le domaine de l'électronique et travailler sur le transistor fut bonne source de motivation à ce projet. C'était agréable d'avoir aussi un professeur présent qui nous aidait de son mieux pour mener à terme nos analyses.

Les seuls inconvénients de ce travail furent que nous ne disposions pas du logiciel sur nos ordinateurs et qu'il a fallu se débrouiller pour pouvoir travailler dessus.

Amine Ait

Ce projet m'a permis d'améliorer mon esprit d'équipe, une qualité importante si l'on veut terminer un projet dans les temps. Une expérience de plus qui me rapproche au monde que j'ai envie de côtoyer plus tard, pour moi apprendre un logiciel comme celui-là me sera avec certitude utile pour l'avenir.

Abel Gama

L'apprentissage et la maîtrise d'un logiciel de simulation numérique est une étape qui nous sera sans doute indispensable pour notre avenir professionnel, quel que soit le domaine d'ingénierie. La création de A à Z d'un modèle est intéressante, et la cohésion du groupe a été un élément fort de notre projet. Il a été plus aisé de surmonter les difficultés et de progresser grâce à cette entente, ce qui m'a prouvé une fois de plus l'importance du travail d'équipe.

5.2. Conclusion générale

Ce projet nous aura offert la possibilité de découvrir un logiciel, qui nous était jusqu'alors inconnu, pourtant une référence dans le monde de la simulation numérique.

Nous nous sommes rapprochés de ce que pouvait être une des phases dans la conception, la simulation numérique est en effet capitale aujourd'hui pour des pièces miniatures comme les transistors. Cette phase requiert à la une bonne maîtrise du logiciel mais aussi une grande précision. Un savoir plus poussé de ce logiciel nous aurait permis d'exploiter un peu plus les nombreuses fonctions qui le composent.

Par ailleurs, nous avons acquis un certain nombre de connaissances en termes de transistor, de mécatronique et de modélisation 3D. Grâce à notre modèle et à nos analyses, nous nous sommes rendus compte de l'utilité que pouvait avoir ce type de logiciel dans le monde de l'industrie.

Ces outils, informatisés, offrent donc un gain de temps non négligeable, conduisant en plus à des résultats optimaux si ces outils sont bien maîtrisés. De plus, ce projet nous aura permis de développer une fois de plus la notion de travail de groupe, nécessitant une très bonne organisation du travail et aussi du temps. De plus, grâce à une bonne entente générale, nous avons pu compter sur l'aide de chacun lors des difficultés rencontrées.

Pour finir, nous sommes satisfaits du travail réalisé, nous avons réussi avec succès certaines analyses.

Ce projet fut donc une expérience enrichissante, et formatrice pour chacun d'entre nous.

6. BIBLIOGRAPHIE

[1] http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/cours_elec/jfet.pdf (valide à la date du 06/06/2016).

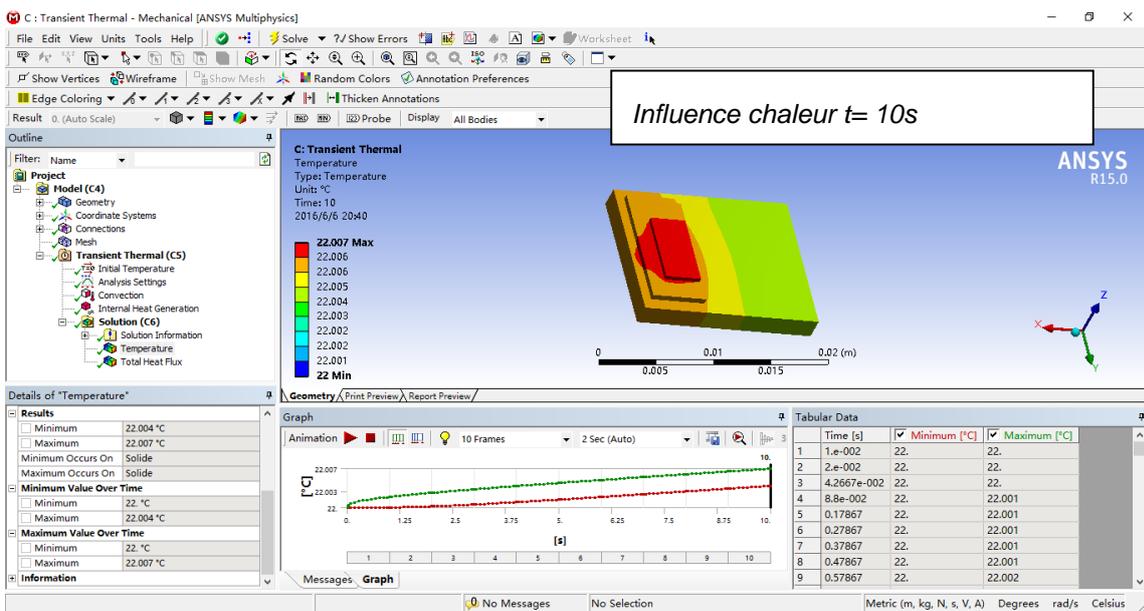
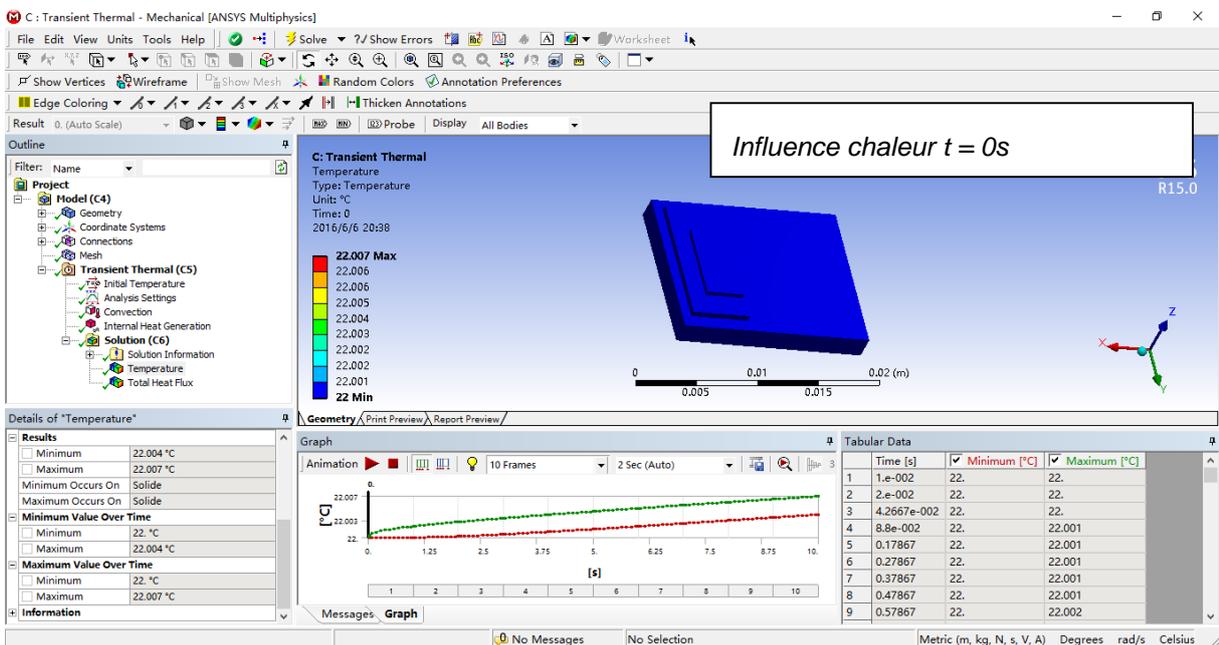
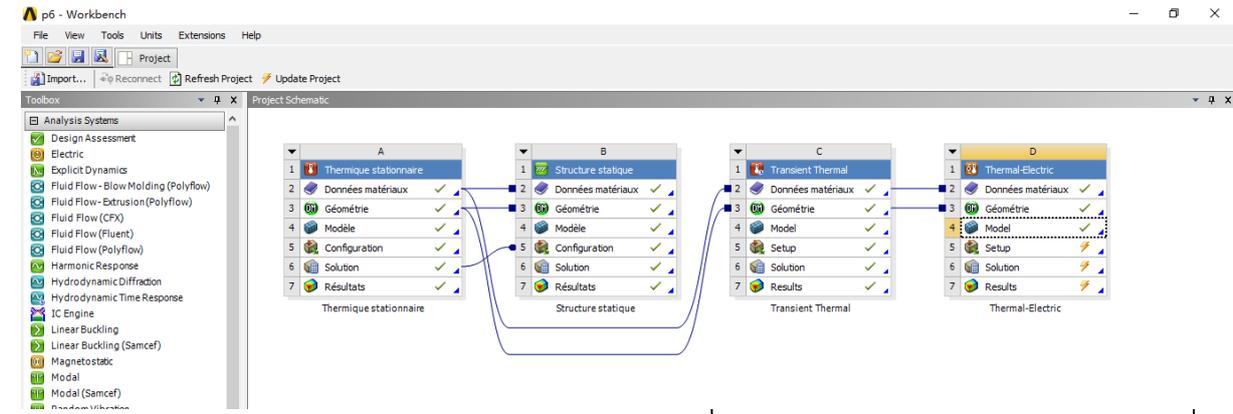
[2] http://mms2.ensmp.fr/ef_paris/formulation/polycop/f_coursEF.pdf (valide à la date du 06/06/2016).

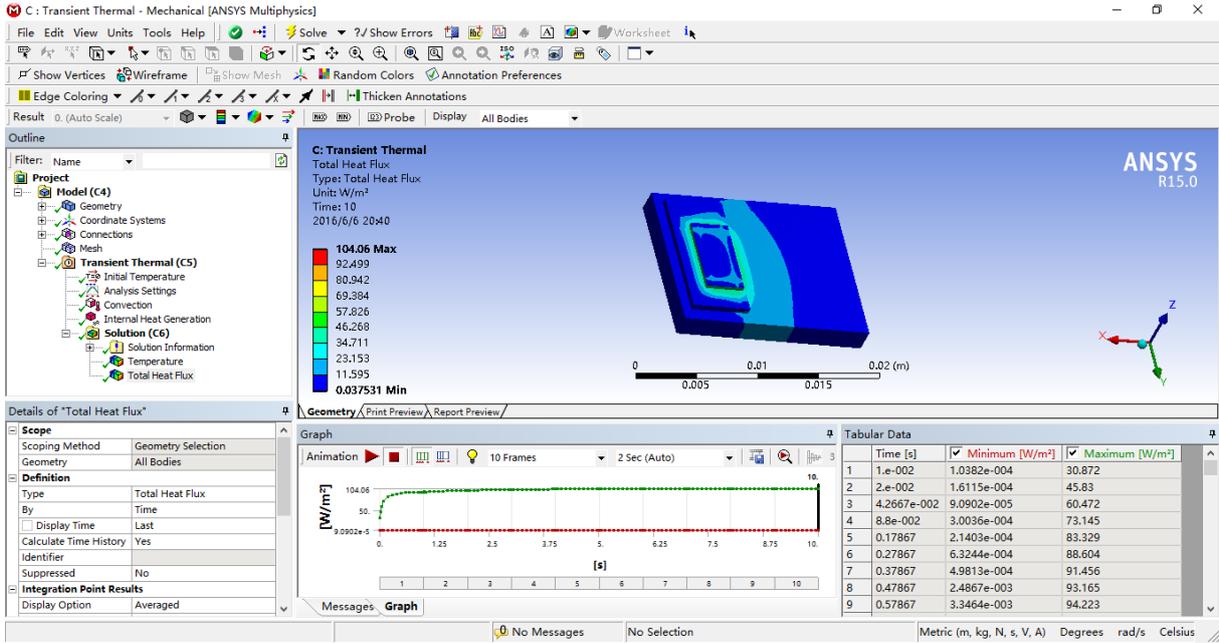
[3] <https://fr.wikipedia.org/wiki/ANSYS> (valide à la date du 06/06/2016).

7. TABLE DES ILLUSTRATIONS (AVEC LÉGENDES)

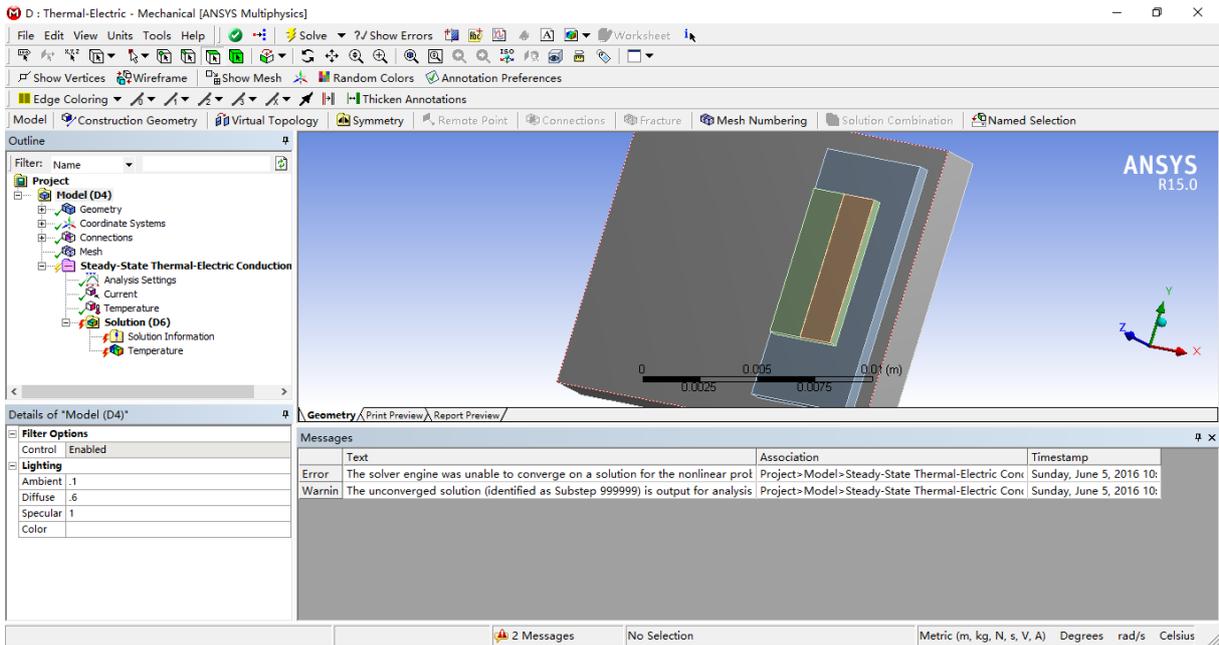
- Figure 1 : Transphorm TPH3205WS.....8
- Figure 2 : Transistor à effet de champ...9
- Figure 3 : Transistor en coupe.....10
- Figure 4 : Transistor en coupe.....10
- Figure 5 : Maillage d'une surface.....11
- Figure 6 : Maillage du modèle.....14

8. ANNEXES (DÉBUT D'ANALYSE TRANSITOIRE)



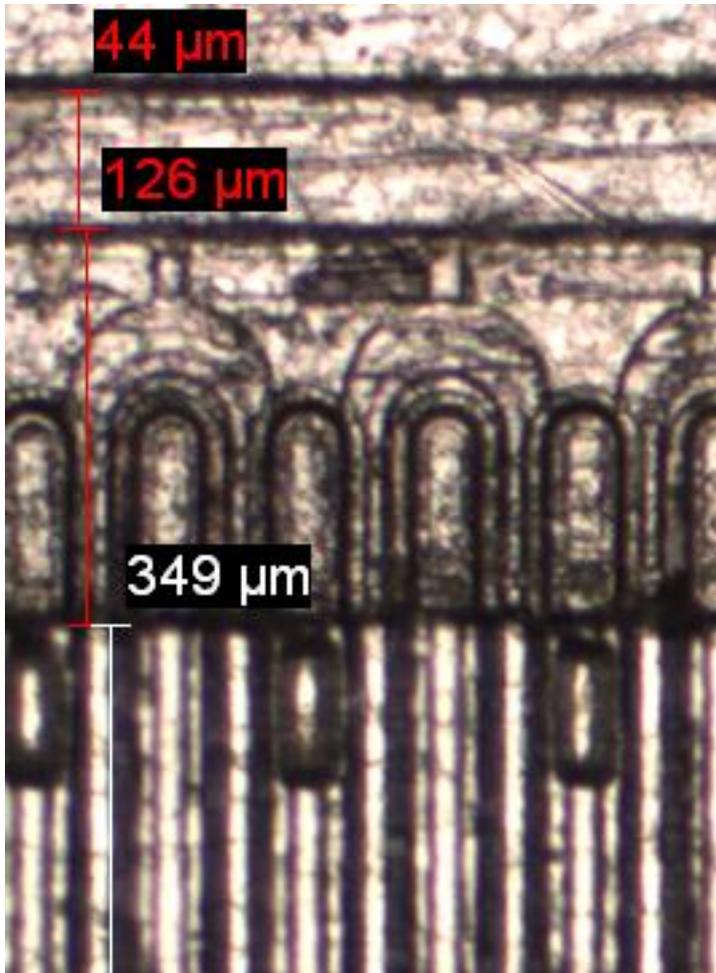


Flux de Chaleur

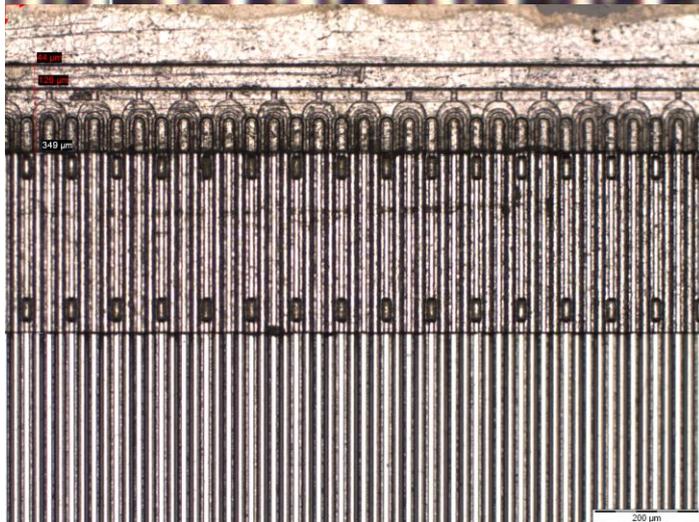


Analyse Électrique non terminée

+observations microscopiques du transistor :



On est à l'échelle du μm



Drain et Source s'alternent