

Méthode de caractérisation thermique de transistors de puissance adaptée à l'ébullition libre – Application à la caractérisation de dissipateurs fabriqués par impression 3D et frittage

Clément Hugon 30 janvier 2025

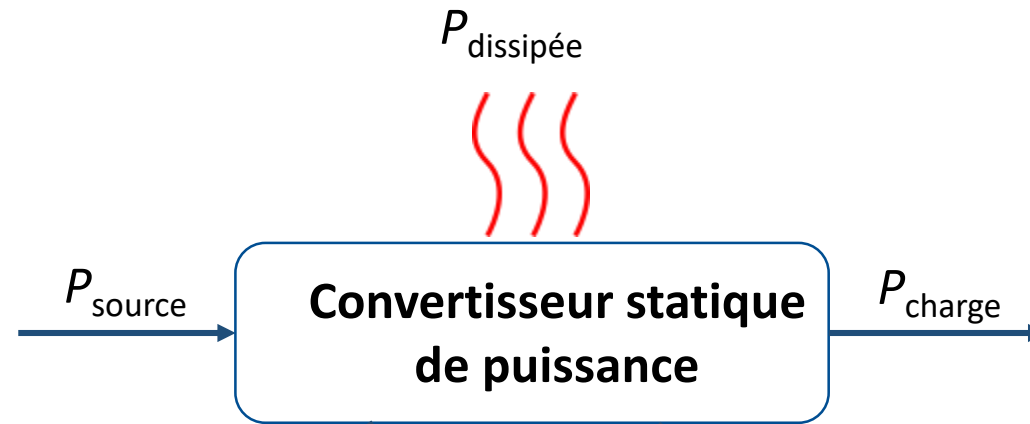


Encadrement:
Yvan Avenas
Samuel Siedel

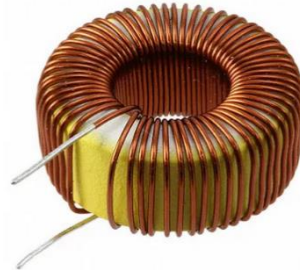


Contexte

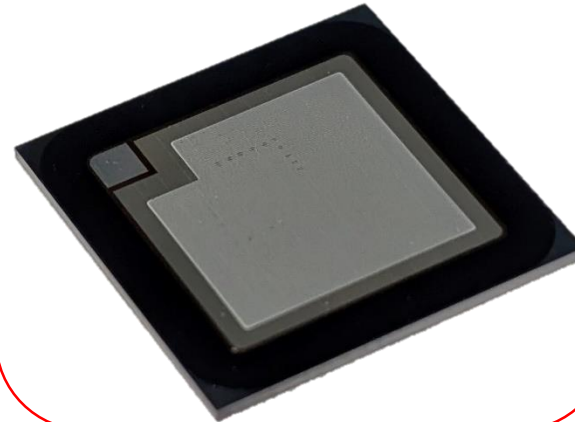
Les convertisseurs de puissance statique



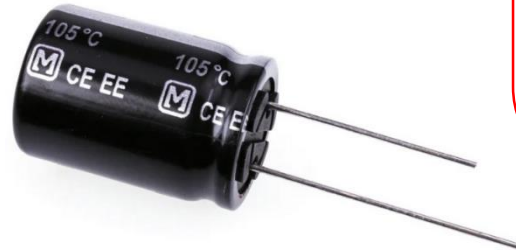
Composants passifs



Composants semi-conducteurs

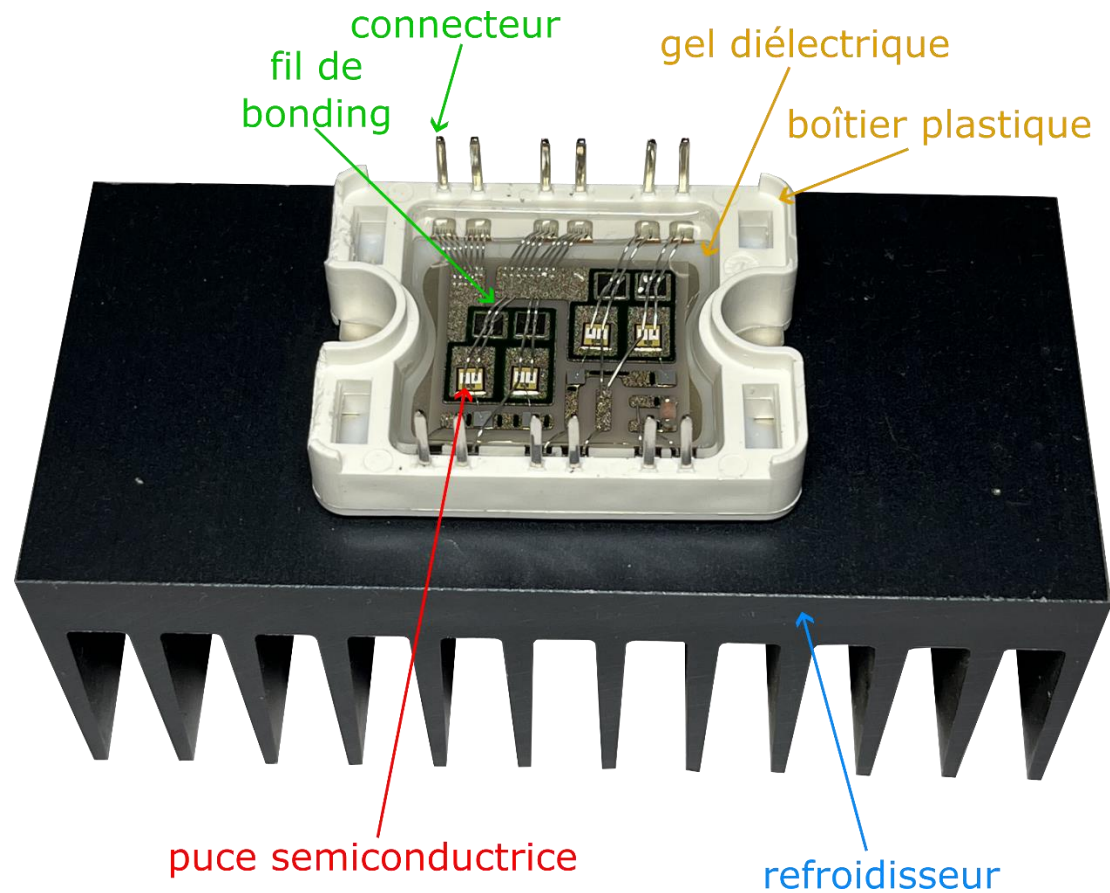


Module de puissance



Charge

Source d'énergie



Plusieurs fonctions :

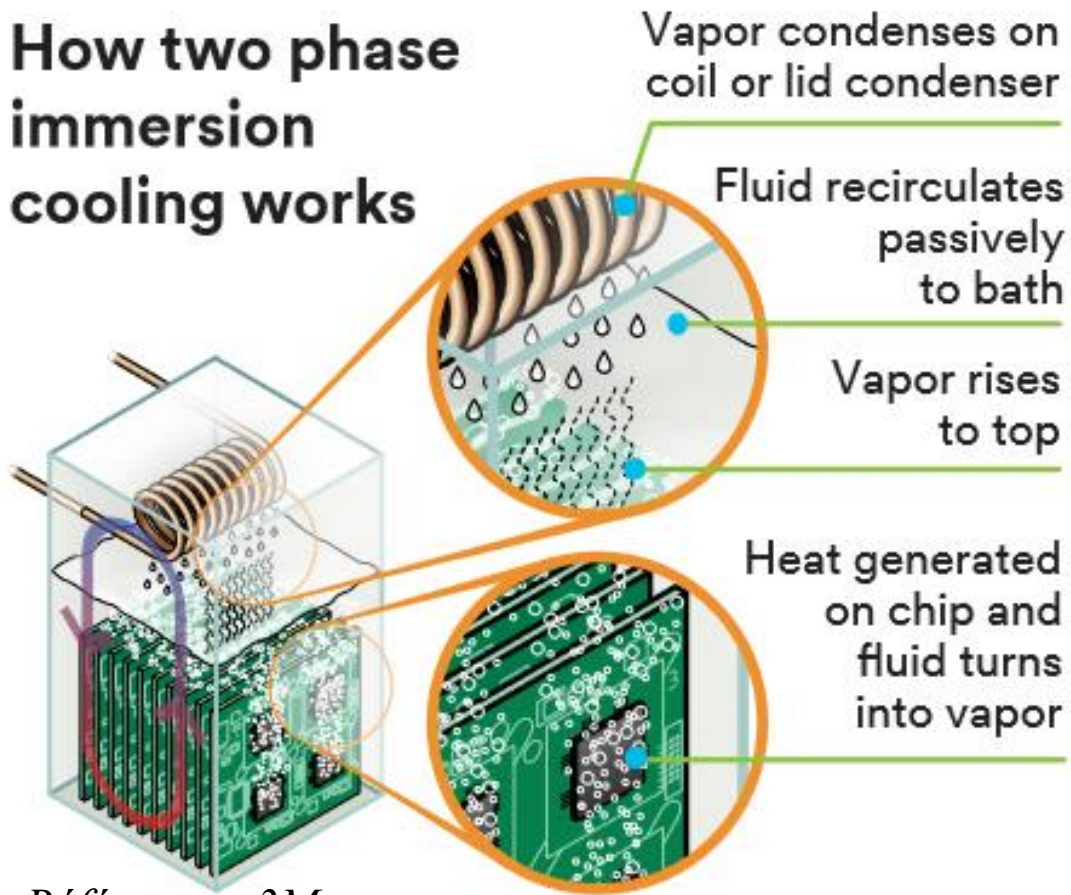
- **Interconnecter** les puces
- **Protéger** les puces
- **Evacuer** la chaleur

Cependant :

- **Forte proximité** des puces
- **Fortes densités de flux de chaleur** à évacuer

Le refroidissement par ébullition libre

How two phase immersion cooling works



Référence : 3M

<https://multimedia.3m.com/mws/media/1602994O/novec-immersion-cooling-article-english.pdf>

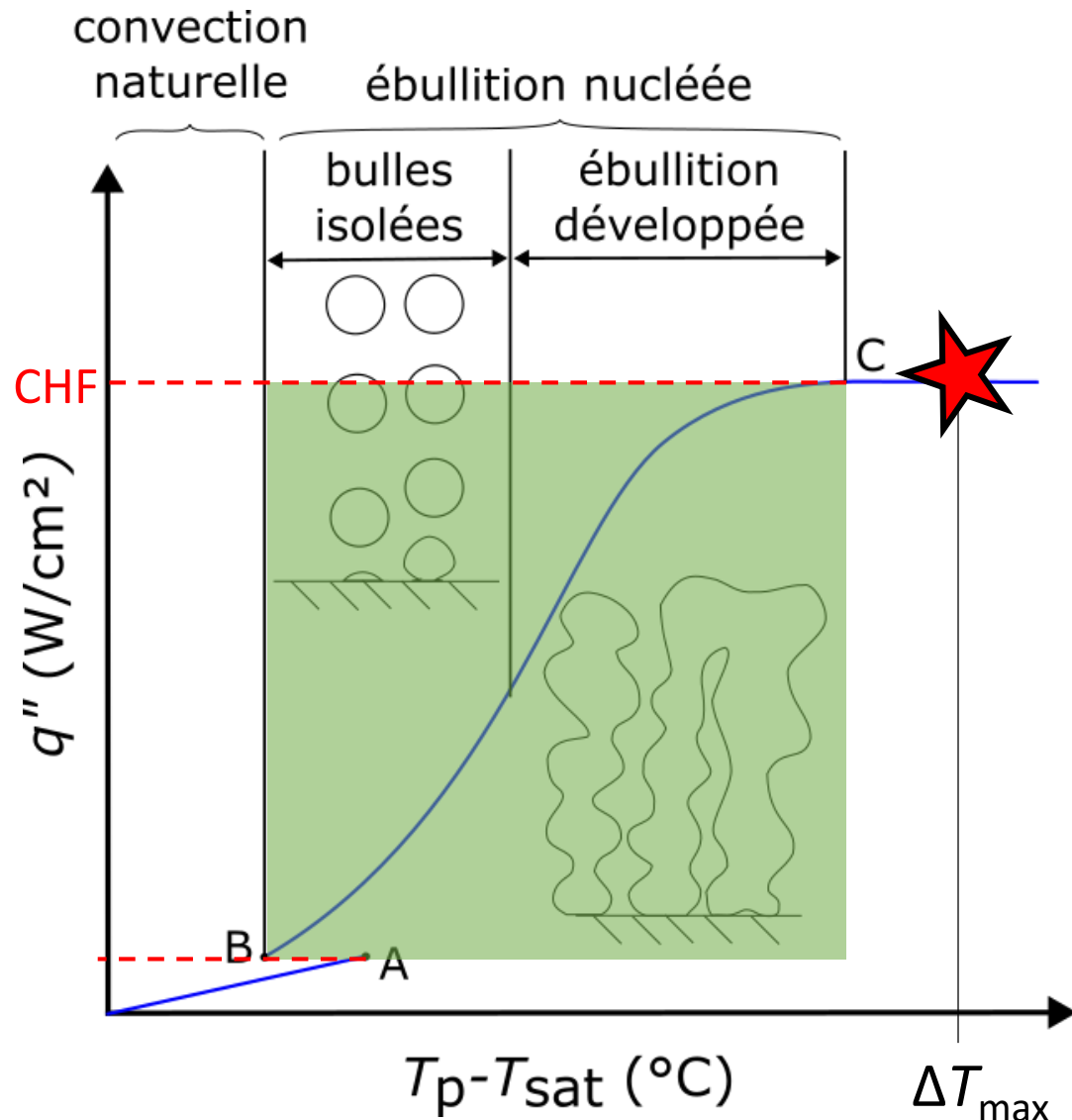
- Refroidissement **direct** au plus proche des composants
- **Intensification** des transferts de chaleur
- Transferts de chaleur **passifs**

Pour l'électronique de puissance :

- **Immersion** dans le refroidisseur
⇒ ∟ le nombre d'interfaces
- **Isolation électrique** faite par le fluide
- **Refroidissement individuel** des puces
⇒ ∟ des densités de flux de chaleur
⇒ Assemblage mécanique plus simple
- Conception **modulaire**

Contexte

Notions sur l'ébullition libre

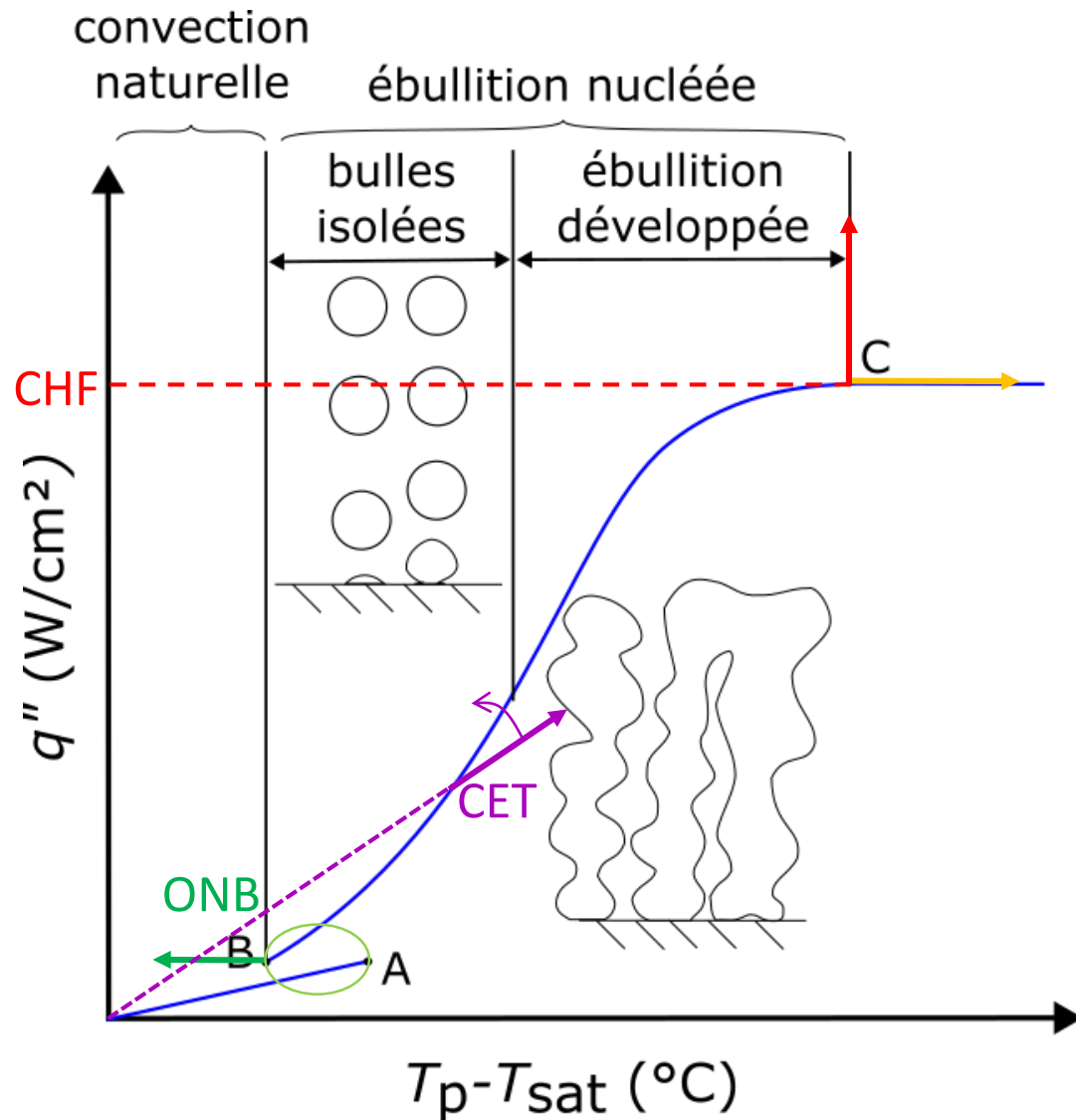


L'ébullition nucléée :

- Création de **bulles de vapeur** ➡ **↑ des transferts de chaleur**
- **Convection** intensifiée
- **Fluide** de refroidissement ➡ **Impacte les transferts de chaleur**
- **Limitations :**
 - Flux critique (CHF) ➡ **Détérioration des composants**
 - Flux d'apparition des bulles ➡ **Contraintes thermiques**

Contexte

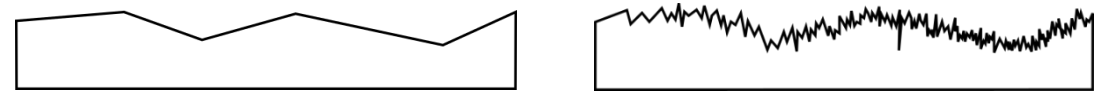
Amélioration du régime en ébullition nucléée



Axes d'amélioration :

- **CHF** :
 - **Augmenter**
 - Atteint pour de **plus fortes surchauffes**
- **Apparition des bulles (Onset of Nucleate Boiling):**
 - **hystérésis de température ($T_A - T_B$)**
 - Atteint pour de **plus faibles surchauffes**
- **Amélioration** des coefficients d'échange thermique (CET)

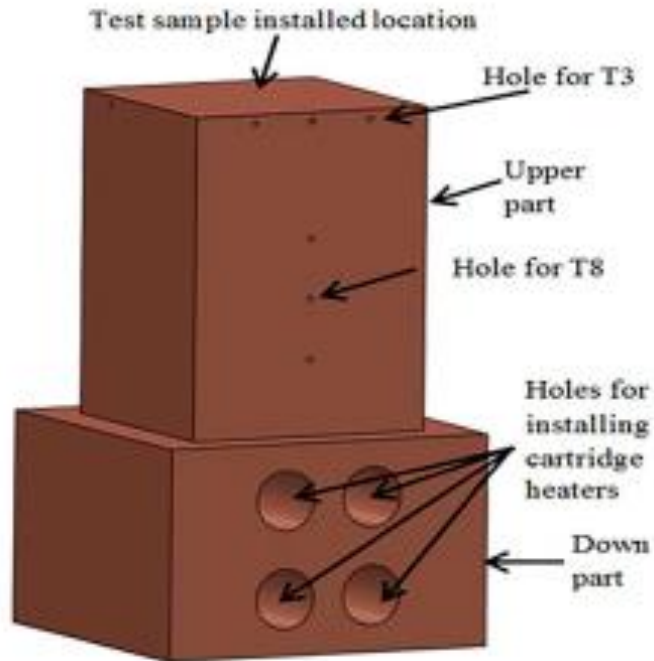
La création d'anfractuosités permet d'agir sur ces différents axes



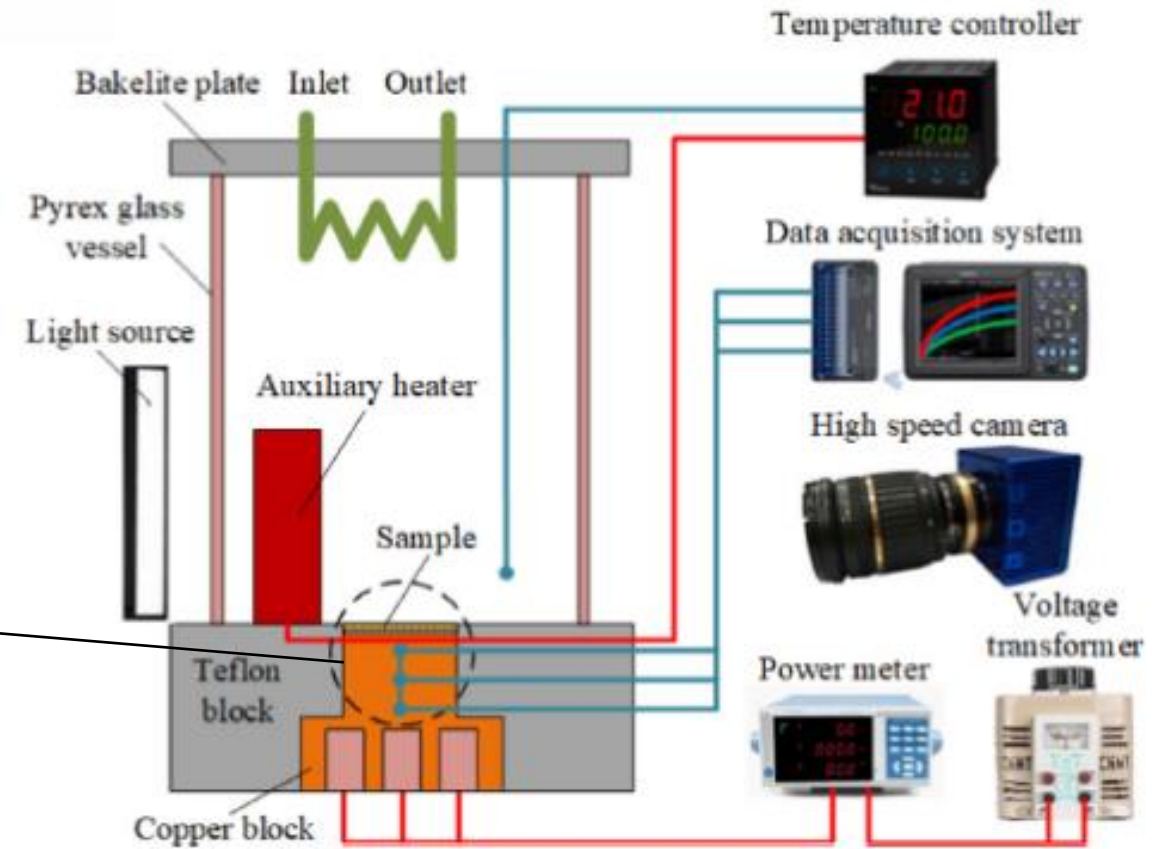
➡ structuration de surface

Contexte

Bancs d'essai de l'état de l'art



Référence : Sajjad et al., *J Enhanc Heat Transf*, 2020



Référence : Tang et al., *Renewable Energy* 2022

- Flux de chaleur **quasi homogène**
- **Gradient de température faible** sur la surface => utilisation de thermocouples
- Caractérisation des transferts de chaleur entre **la surface et le liquide** en **régime stationnaire**

Sections d'essai usuelles vs semi-conducteurs de puissance

	Etat de l'art	Dans un module de puissance
Source de chaleur	Cartouches chauffantes $T_{\text{lim}} \sim 300^{\circ}\text{C}$	Puces semi-conductrices Si $T_{\text{lim}} \sim 175^{\circ}\text{C}$
Flux de chaleur	Homogène	Hétérogène
Gradient de température	Faible	Elevé
Mesure de température	Thermocouples	?
Condition d'étude	Stationnaire	Stationnaire et dynamique

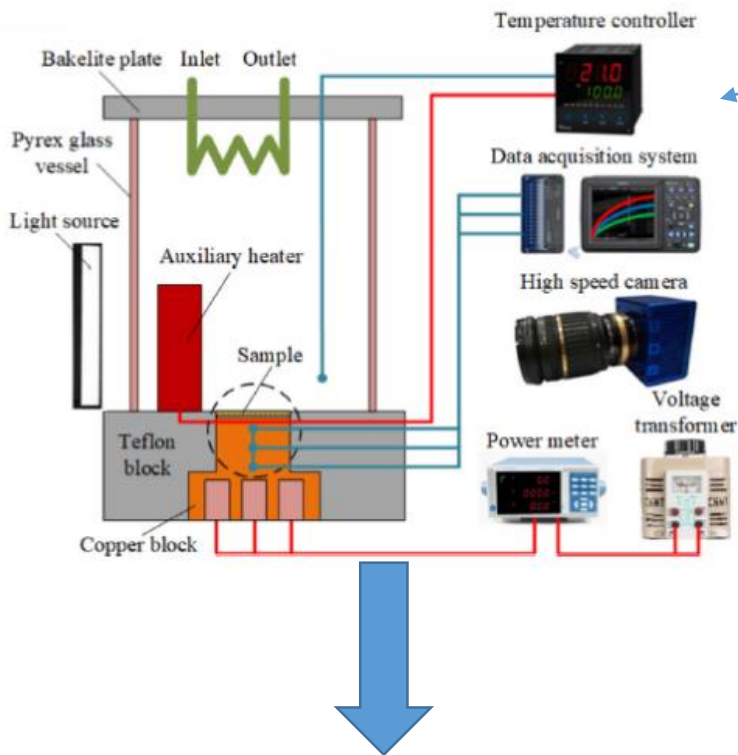
Comment mesurer la température des composants semi-conducteurs?

- Avec **de forts gradients** de température
- En régime **stationnaire** et en **transitoire**

Comment protéger les composants semi-conducteurs de surchauffes?

Objectifs des travaux de thèse

Caractériser le refroidissement par **ébullition libre** en **approchant le fonctionnement normal des modules de puissance**



Conception d'un banc expérimental

Etude en régime stationnaire
et en transitoire

Protection des transistors
contre les surchauffes



Utilisation des transistors comme:

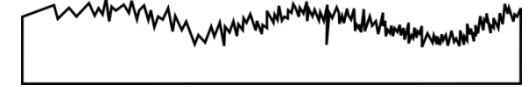
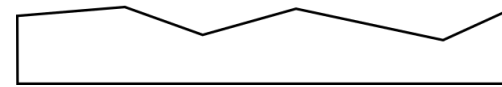
- source de chaleur
- capteur de température

Mise en œuvre d'une méthode de
mesure de température des transistors

Objectifs des travaux de thèse

Refroidissement des transistors de puissance par ébullition libre

Améliorer les transferts de chaleur par ébullition libre
par **structuration de surface**



Fabrication de dissipateurs structurés par impression 3D et frittage



Caractérisation thermique des dissipateurs structurés

SOMMAIRE

Banc expérimental et section d'essai

Méthode de mesure de la température

Protéger les transistors de surchauffes

Régimes stationnaires et transitoires

Conclusion et perspectives

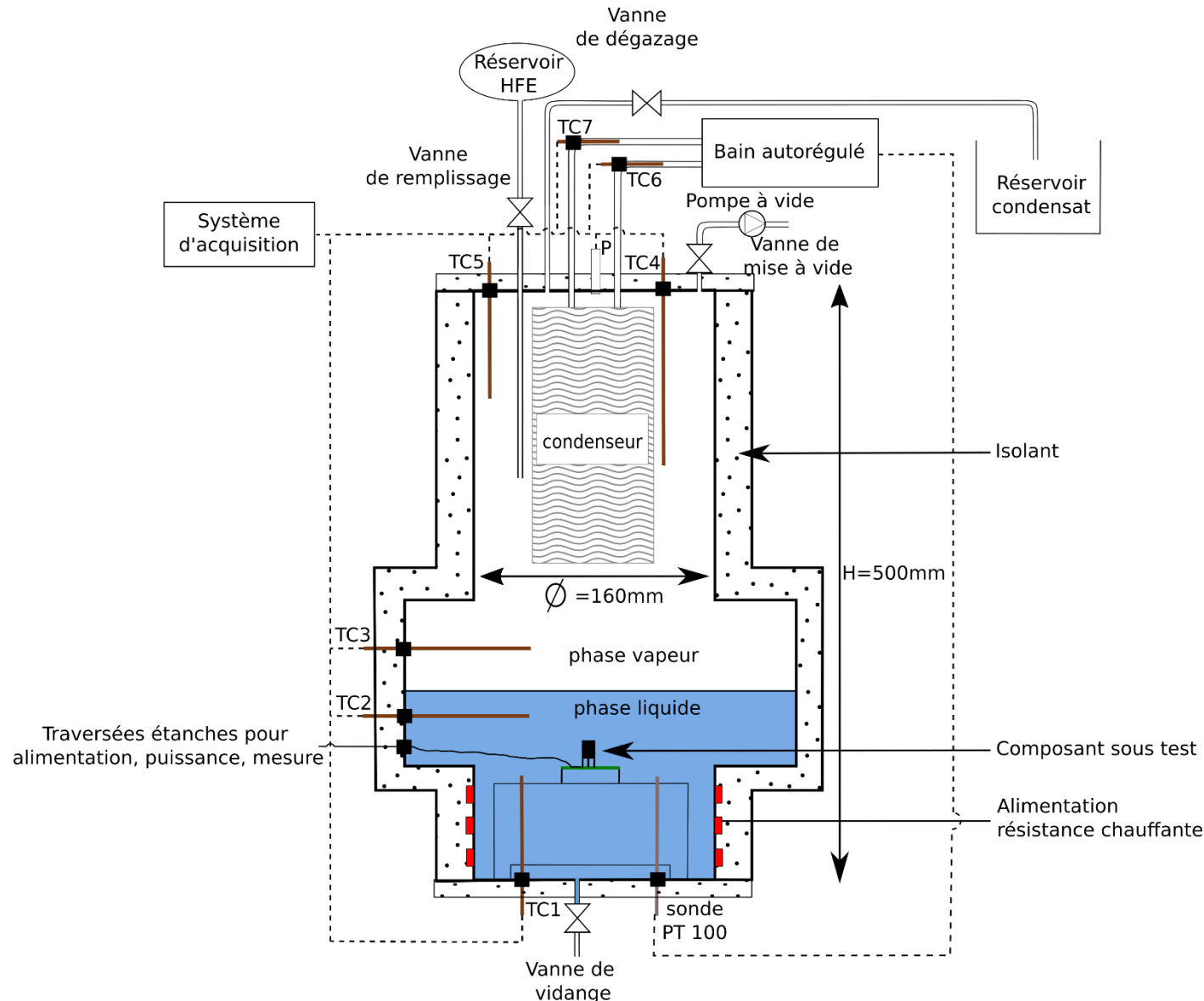
Banc expérimental et section d'essai

Présentation du banc d'expérimental

Pôle technique



Merci Sébastien Flury!

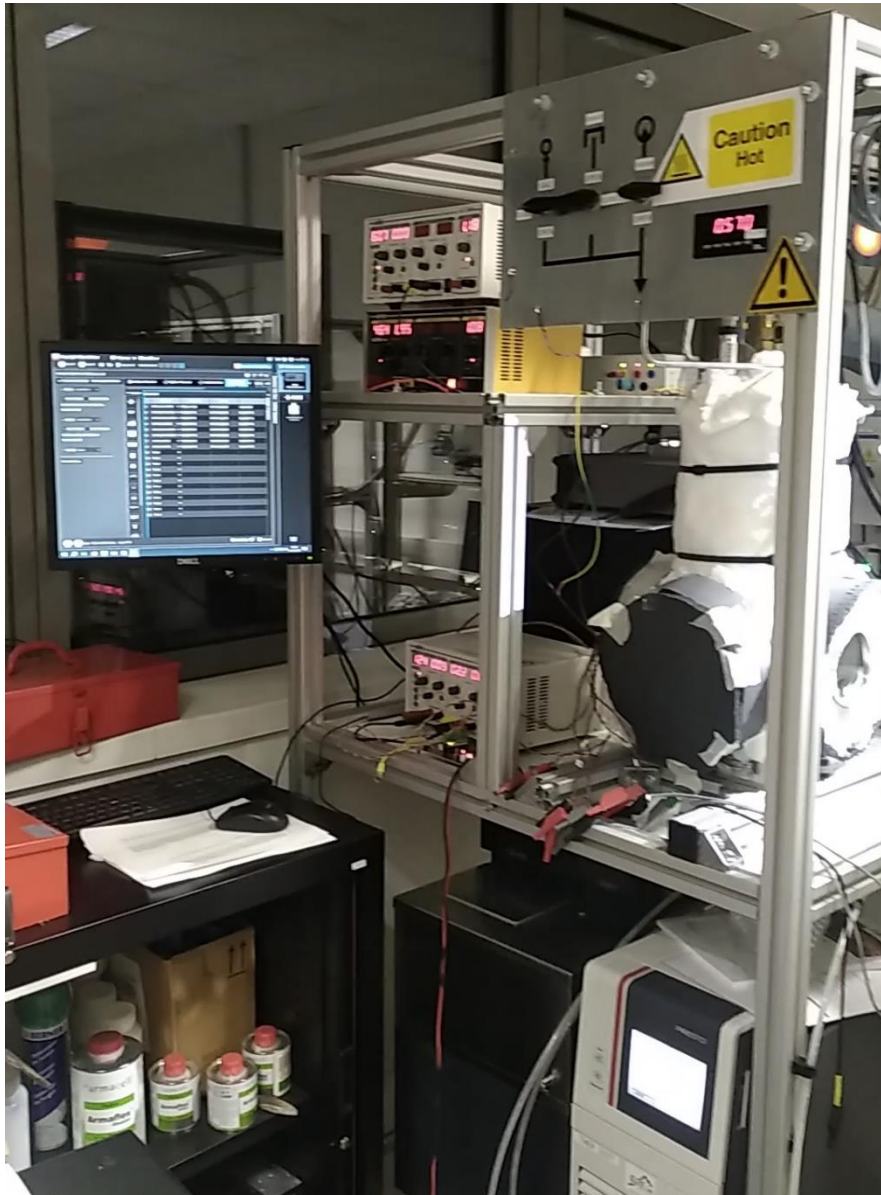


Cahier des charges:

- **Caractériser plusieurs composants jusqu'à un convertisseur :**
 - Dimensionnement **condenseur**
 - Connectiques électriques isolées jusqu'à 15kV
- Hublot de **visualisation**
- **Régulation** de la température de saturation T_{sat}
 $40^{\circ}\text{C} \leftarrow T_{\text{sat}} \rightarrow 80^{\circ}\text{C}$
- **Mesure de T_{sat} par thermocouples**

Banc expérimental et section d'essai

Présentation du banc d'expérimental



Pôle technique



Merci Sébastien Flury!

Cahier des charges:

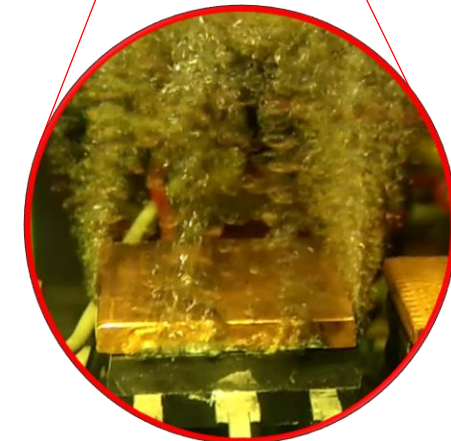
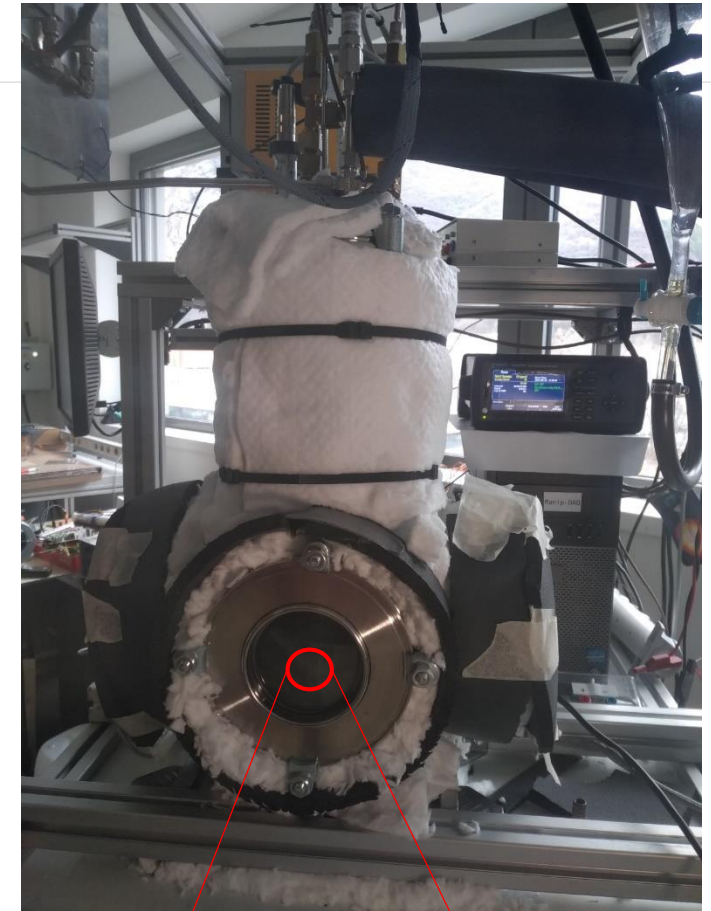
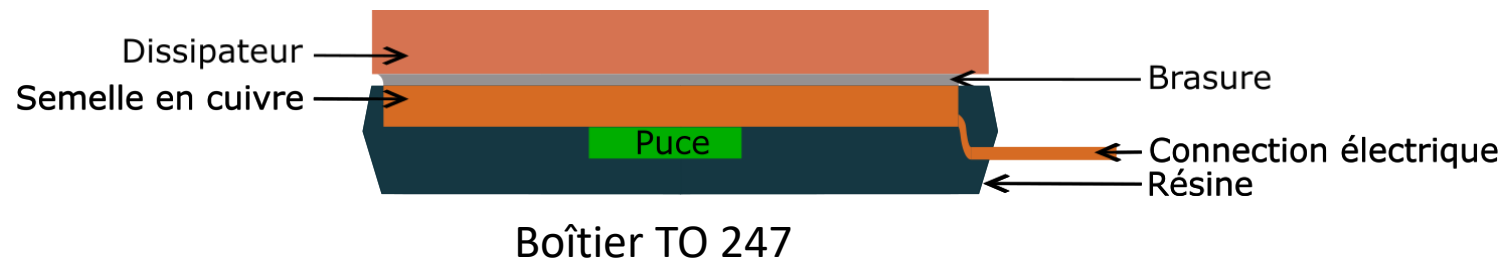
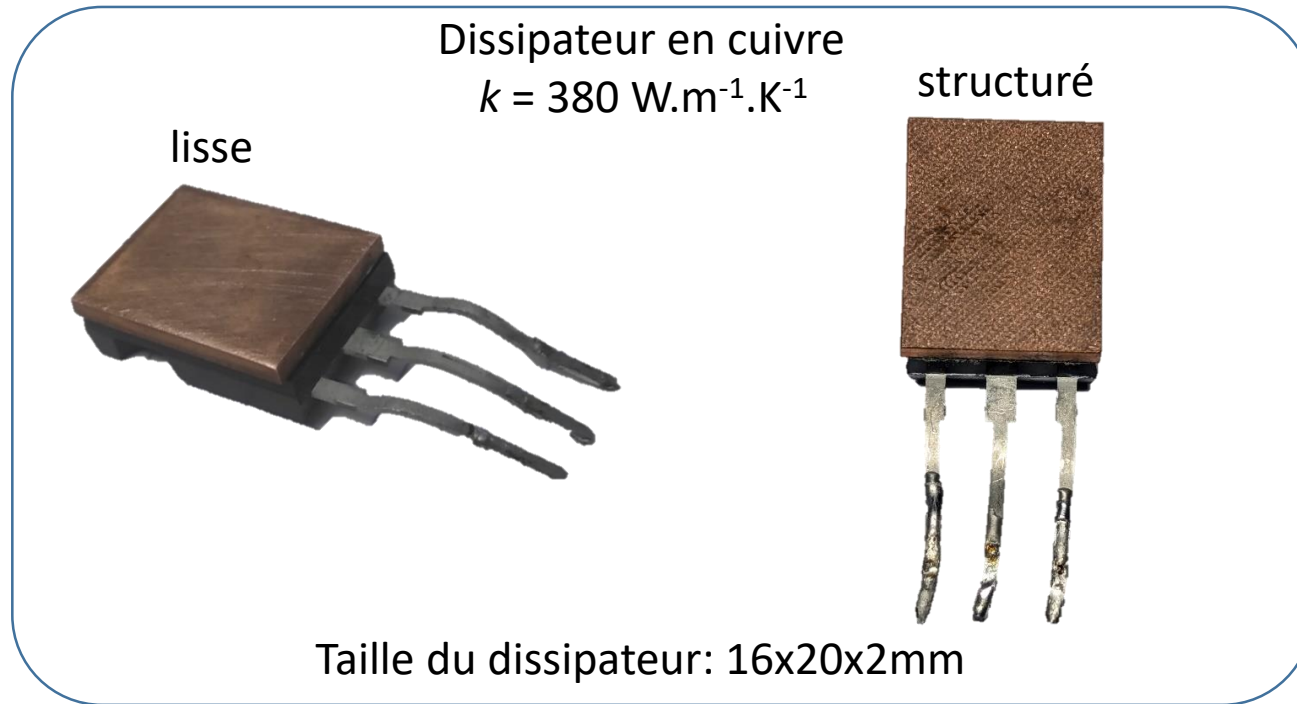
- **Caractériser plusieurs composants jusqu'à un convertisseur :**
 - Dimensionnement **condenseur**
 - Connectiques électriques isolées jusqu'à 15kV
- Hublot de **visualisation**
- **Régulation** de la température de saturation T_{sat}
 $40^{\circ}\text{C} \leftarrow T_{\text{sat}} \rightarrow 80^{\circ}\text{C}$
- **Mesure** de T_{sat} par **thermocouples**

Le fluide **HFE 7200** est choisi pour:

- Sa caractéristique **isolant électrique**
- Ses **propriétés thermodynamiques** intéressantes sur la plage de température visée

Banc expérimental et section d'essai

Présentation des sections d'essai



Banc expérimental et section d'essai

Méthode de fabrication des dissipateurs structurés

Impression 3D de particules de cuivre

- Fabrication additive de pièces complexes
- Granules: **particules de cuivre + liant**



Déliantage

- Chimique: eau à 70°C pendant 12h
- Thermique: 500 °C pendant 1h sous atmosphère réductrice



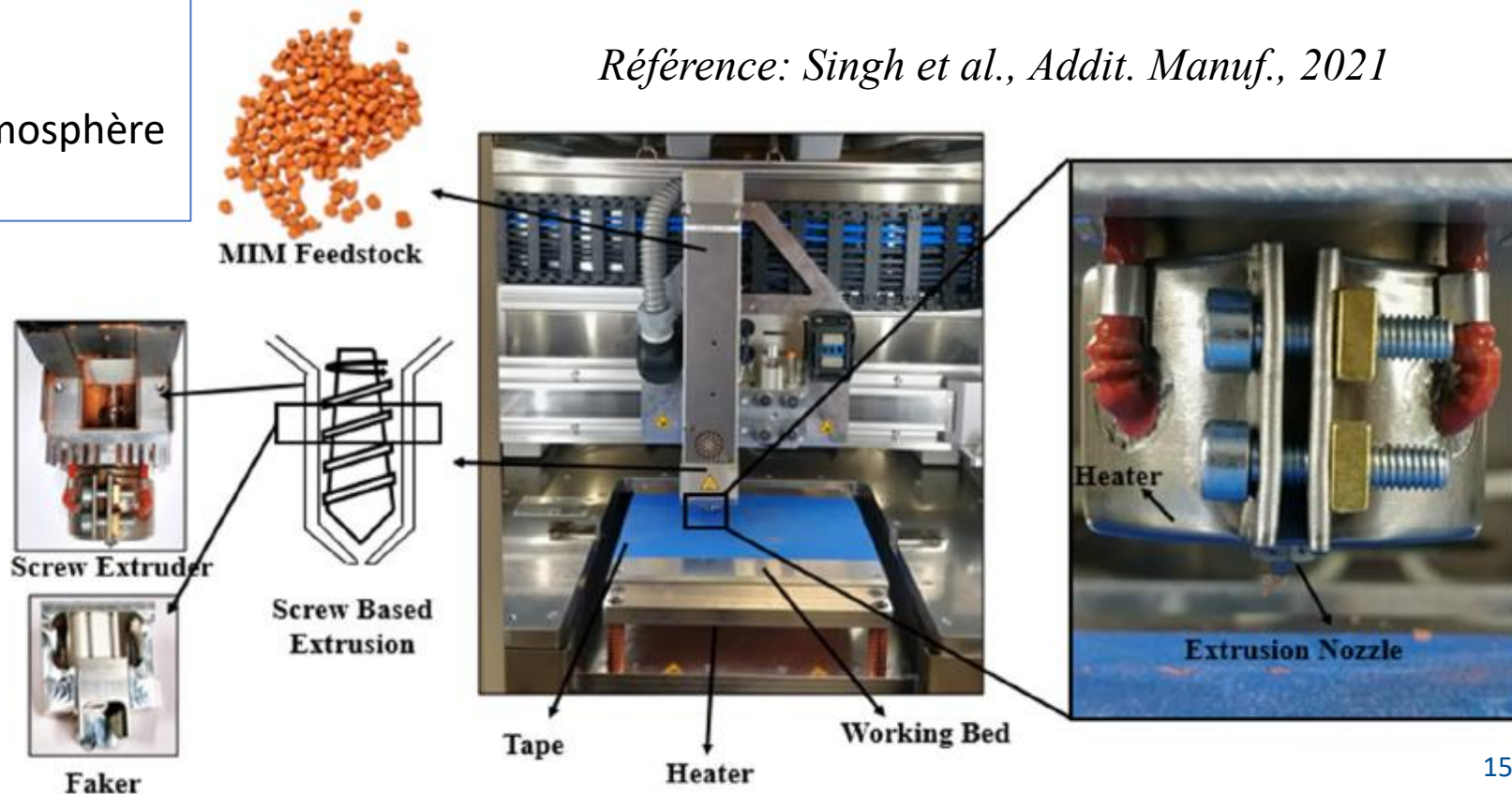
Frittage

- **Haute température** sans dépasser la température de fusion sous atmosphère réductrice
- Crée des **ponts** entre les particules de cuivre
- + température de frittage est élevée + la pièce est dense



Je remercie
Jean-Michel Missiaen
Gurminder Singh

Référence: Singh et al., Addit. Manuf., 2021



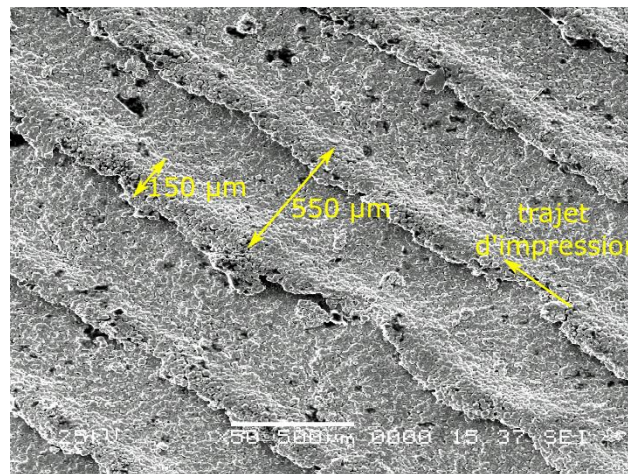
Banc expérimental et section d'essai

Avantage de la méthode de fabrication

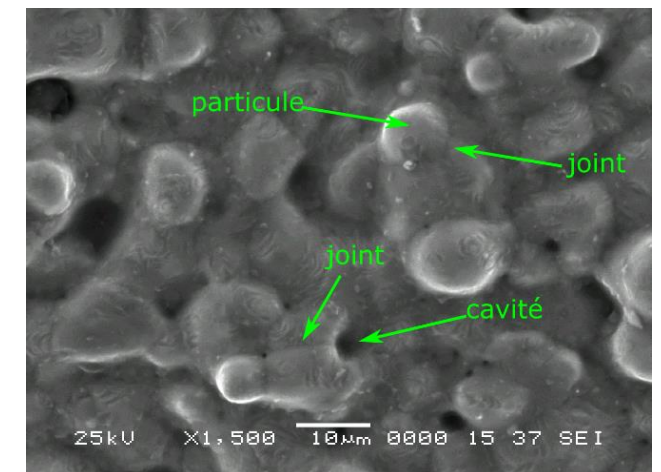
- Pièces relativement **complexes**
- **Plusieurs échelles** de structuration:
Millimétrique liée à la géométrie
⇒ **Augmenter la puissance dissipée**



- **Centaines de micromètres** liée aux paramètres d'impression
⇒ Favoriser le **remouillage** de la paroi
 - **Augmenter le flux critique**
 - **Améliorer les transferts de chaleur**



- **Dizaines de micromètres** liée à la taille des particules et à la température de frittage
⇒ **Augmenter le nombre de sites de nucléation**
 - **Apparition de l'ébullition pour de plus faibles surchauffes**
 - **Améliorer les transferts de chaleur**



Banc expérimental et section d'essai

Objectifs des travaux sur la fabrication additive

Pour **différentes géométries**:

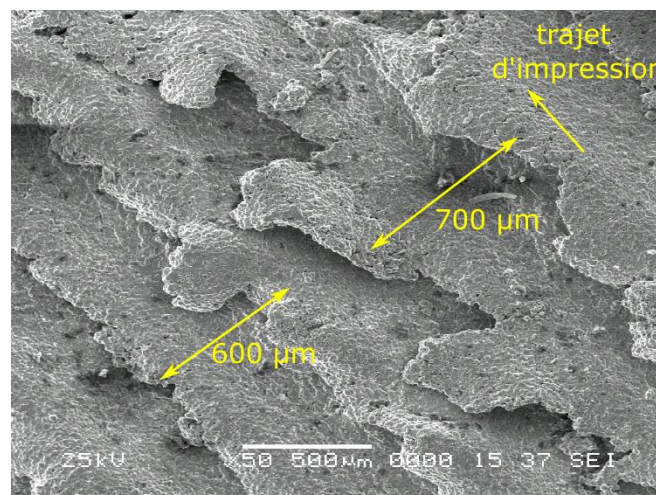
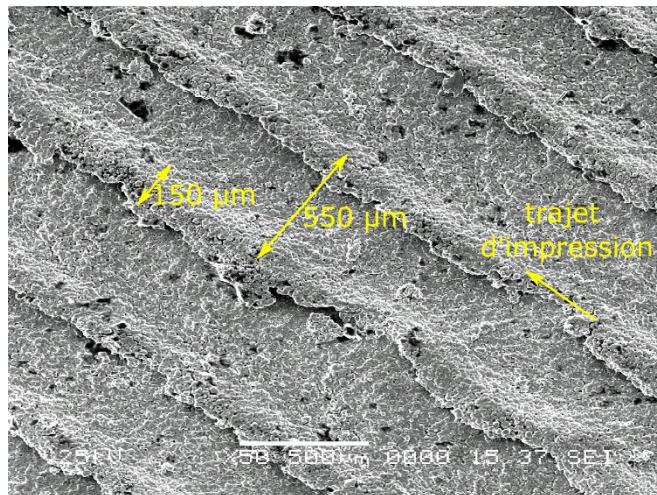
- **Trouver un optimum de paramètres de fabrication** (T_{frittage} , paramètres d'impression) permettant:
 - une bonne **conduction thermique**
 - une **structuration de surface**
- ⇒ **améliorer les transferts de chaleur**

Problèmes de répétabilité à même paramètres de fabrication
lors de deux phases de fabrication

Phase 1

$T_{\text{frittage}} = 975^{\circ}\text{C}$

Phase 2



Travail uniquement sur la
température de frittage

Le banc d'essai

- **Réalisation** d'un banc expérimental **multifonction**
 - Caractérisation **d'un transistors** à un **convertisseur de puissance**
 - Influence du **champ électrique**
- **Maintient** une température de saturation **constante**
- Mesure la **température de saturation**

Section d'essai

- **Transistor** conditionné dans un **boîtier TO247** utilisé comme **source de chaleur**
- **Fabrication** de dissipateurs avec **différentes structurations** de surfaces

SOMMAIRE

Conception du banc expérimental

Méthode de mesure de la température

Protéger les transistors de surchauffes

Régimes stationnaires et transitoires

Conclusion et perspectives

Méthode de mesure de la température

Objectifs

Caractérisation thermique des transistors de puissance :

Impédance thermique entre la puce et le fluide de refroidissement :

$$Z_{th} = \frac{T_j(t) - T_j(0)}{P}$$

- **Température de jonction** T_j : température moyenne de la puce semi-conductrice
- **Puissance dissipée** P par le composant
- $T_j(0)=T_a$: température ambiante du fluide

Résistance thermique entre la puce et le fluide de refroidissement :

$$R_{th} = \frac{T_j - T_a}{P}$$

- $R_{th} = Z_{th}$ en régime stationnaire

⇒ **Mesure précise** de la **température** et de la **puissance dissipée**

Contraintes de l'ébullition libre

Non linéarité des transferts de chaleur :

⇒ Mesure de température **pendant l'échauffement**

⇒ Puissance dissipée **constante**

Méthode de mesure de la température

Mesure directe



Thermocouples



Image infra-rouge



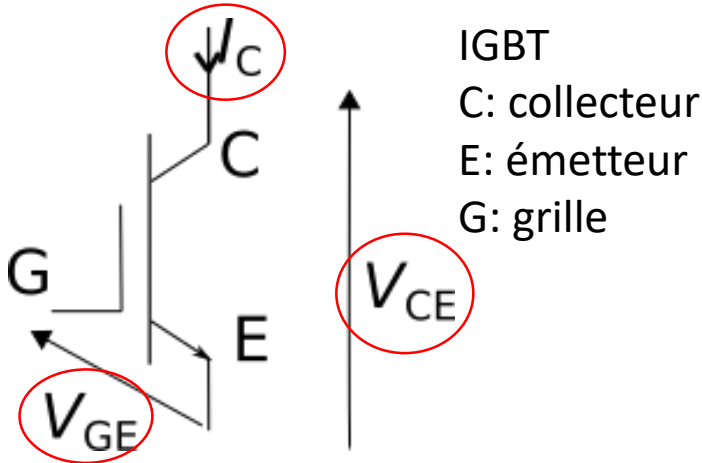
Fibre optique

Inconvénients

- Température **locale**
- Nécessite un **accès à la puce**
- Source de **modification des transferts de chaleur**

Méthode de mesure de la température

Mesure indirecte: paramètre électriques thermosensible (PETS)

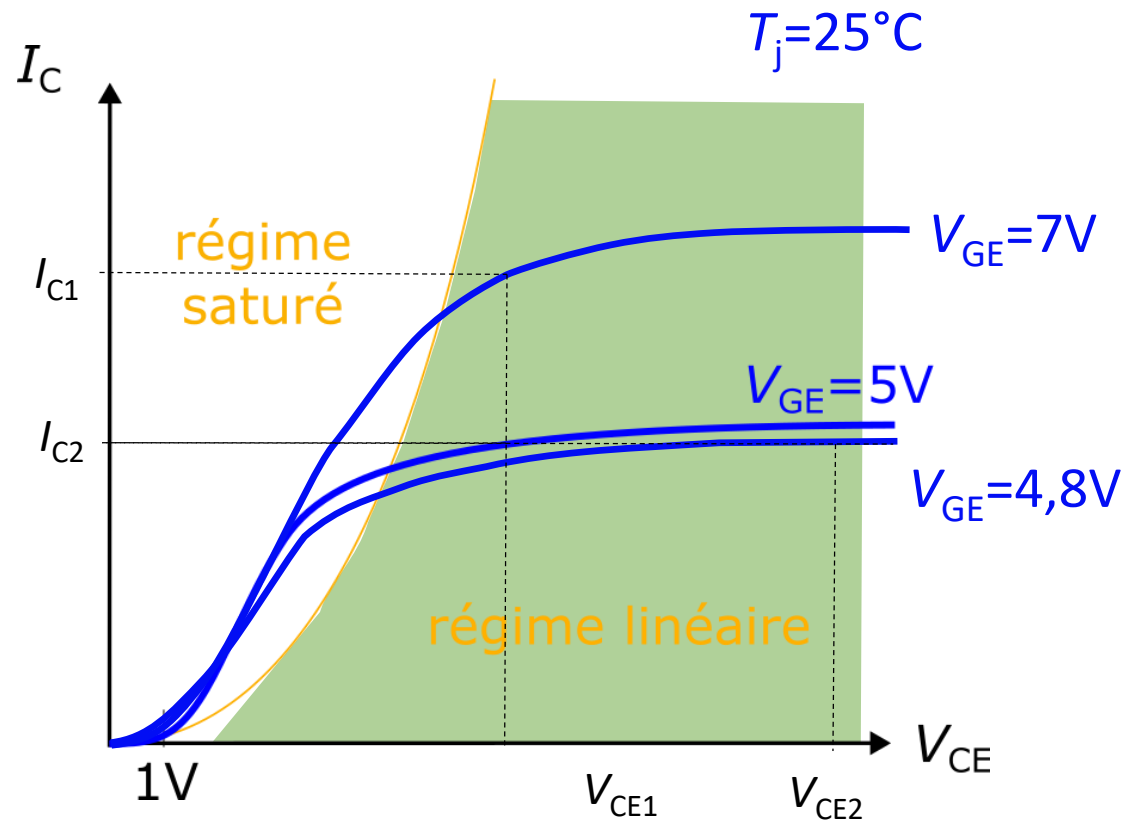


- **PETS**: Relations entre les caractéristiques électriques dépendantes de la température de jonction
- Les mises en œuvres peuvent conduire à un **faible** ou **fort échauffement** du composant

	PETS générant un faible échauffement	PETS générant un fort échauffement			
		V_{CE} fort courant	Courant de saturation	Retard de commutation	V_{GE} fort courant
Mesure de température pendant l'échauffement	✗	✓	✓	✓	✓
Mesure de température à puissance dissipée constante		✗	✗	✗	✓
Mesure de puissance précise		✓	✓	✗	✓

Méthode de mesure de la température

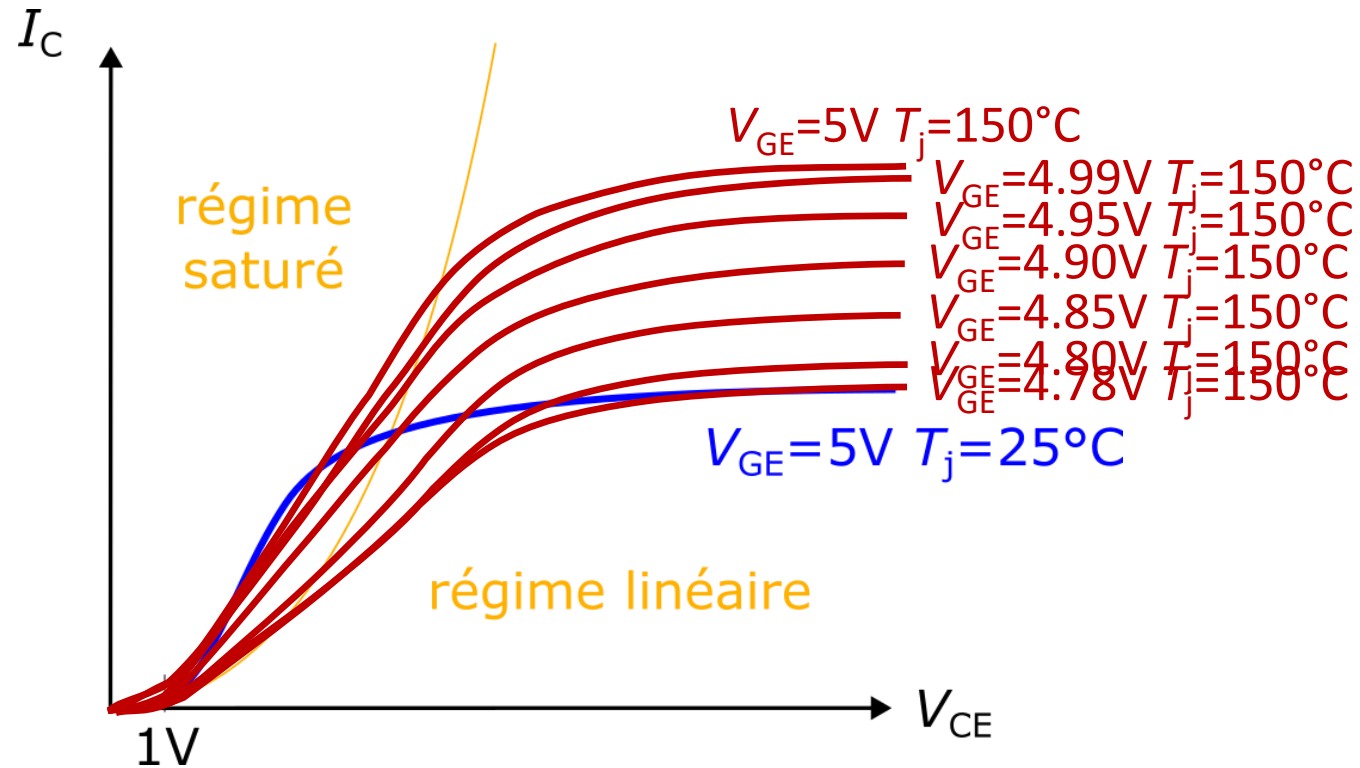
Le paramètre thermosensible V_{GE}



- Utiliser dans la **zone linéaire**
- **Dépend** du courant I_C et de la tension V_{CE}

Méthode de mesure de la température

Le paramètre thermosensible V_{GE}

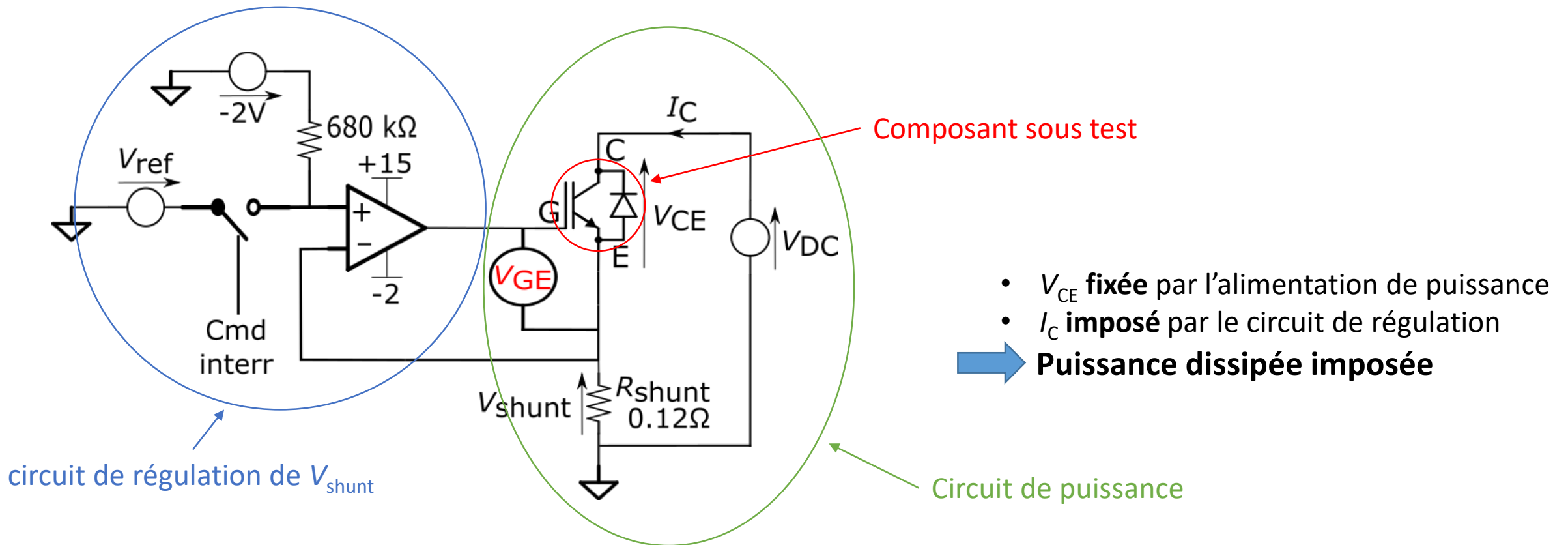


- Utiliser dans la **zone linéaire**
- **Dépend** du courant I_C et de la tension V_{CE}
- $I_C \nearrow$ avec T_j à V_{GE} et V_{CE} constants

A courant I_C et tension V_{CE} constants,
la tension V_{GE} **diminue** quand la température T_j **augmente**

Méthode de mesure de la température

Mise en œuvre de la méthode de mesure



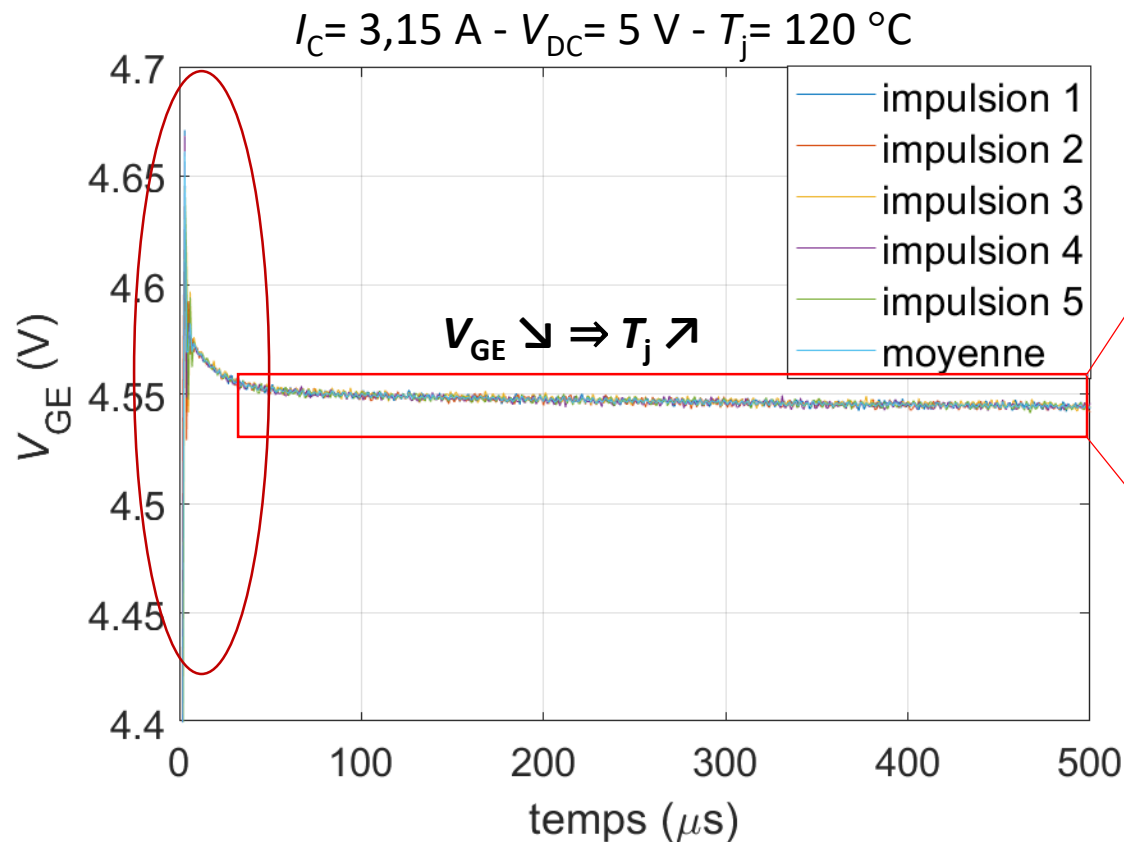
- V_{CE} **fixée** par l'alimentation de puissance
- I_C **imposé** par le circuit de régulation

➡ **Puissance dissipée imposée**

V_{GE} mesurée à puissance dissipée contrôlée { Régime stationnaire
Transitoires

Méthode de mesure de la température

Calibration du PETS V_{GE}

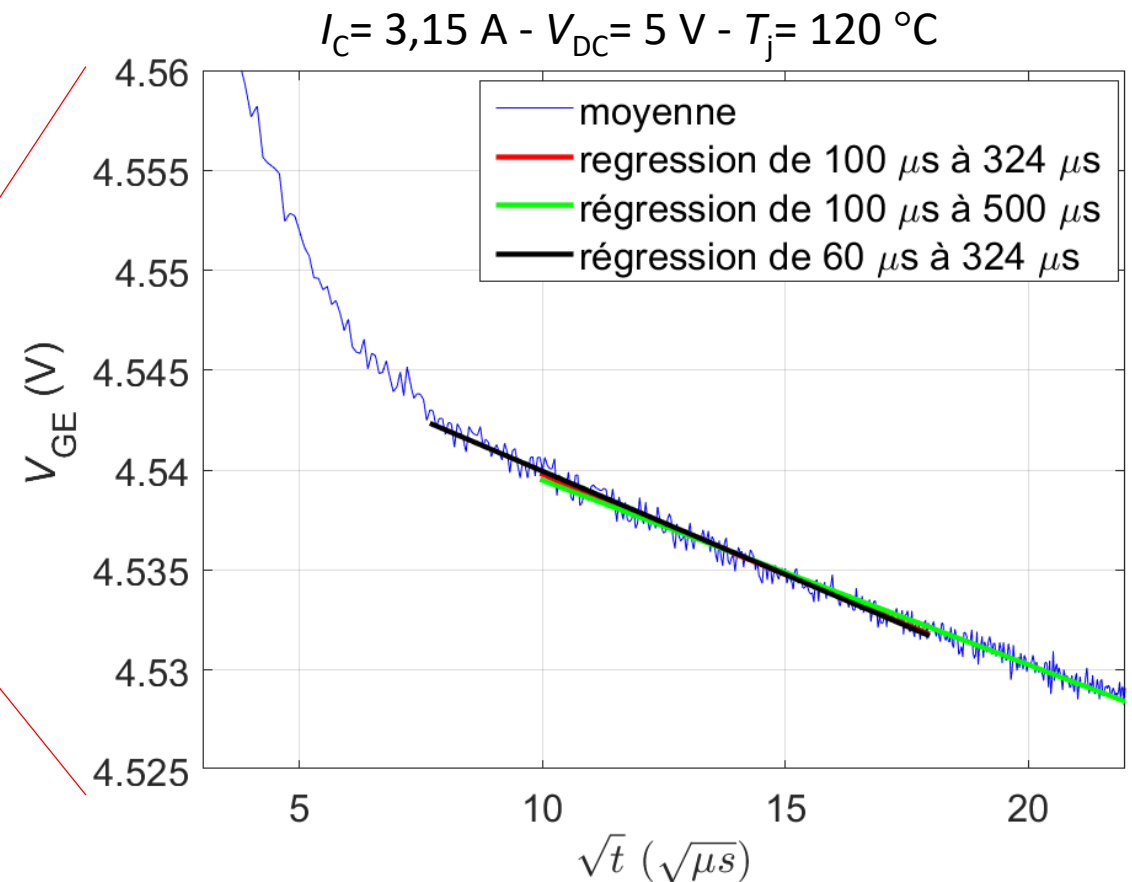


- T_j imposée par plaque chauffante
- 5 impulsions de courant de **500 μs**
- Espacées de **3s**

➡ **Limiter l'échauffement** du composant

Transitoire électrique

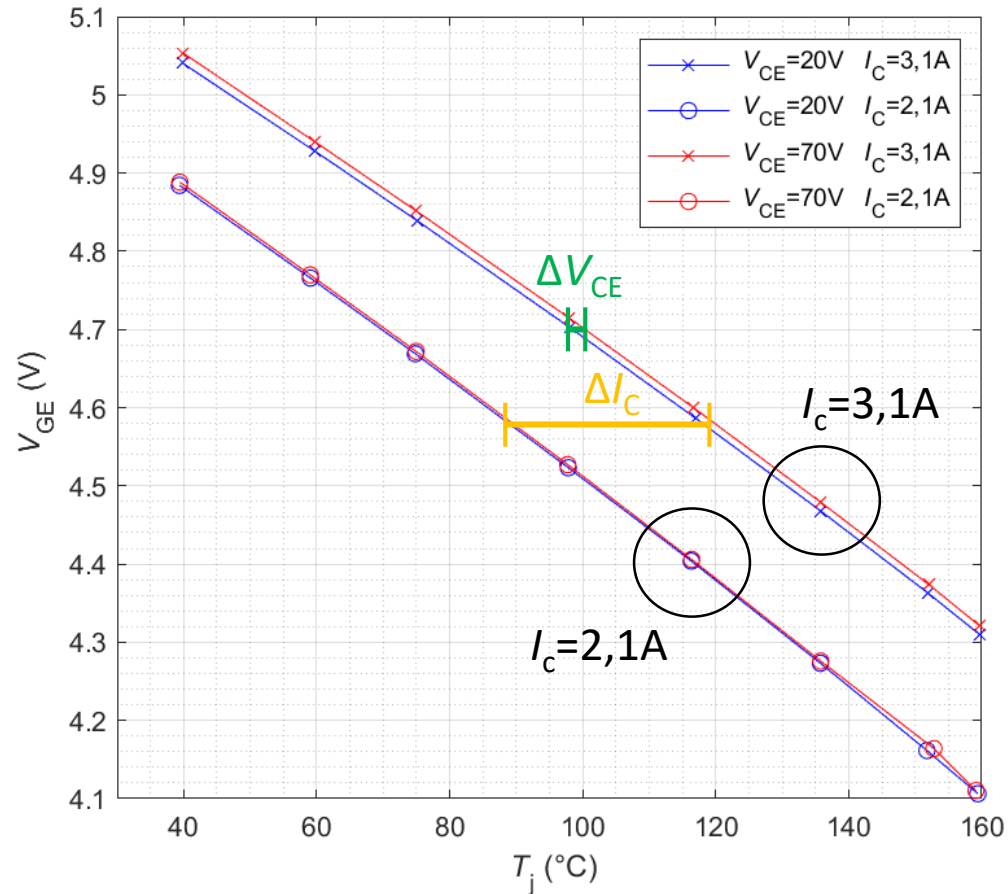
➡ **Mesure V_{GE} non représentative de la température**



- **Extrapolation linéaire** en racine carrée du temps
- Linéarité dépend du **composant**, de **T_j** et de **V_{CE}**
- **Plage temporelle** de l'extrapolation:
 - **précision suffisante et traitement des mesures général** (Ecart de **0,3°C** entre un début d'extrapolation à 60 μs et 100 μs)

Méthode de mesure de la température

Résultats de calibration



V_{GE} + **sensible** au courant I_C qu'à la tension V_{CE}

Pour une mesure de **température plus précise** :
 I_C est **fixé** et V_{CE} est varié pour changer la puissance dissipée



Comment connaître T_j pour n'importe quelles tensions V_{GE} , V_{CE} pour un courant donné ?

Méthode de mesure de la température

Interpolation et incertitudes

Calibration

Multitude de points de mesure (V_{CE} , V_{GE} , T_j) à courant donné



Méthode des moindres carrés
appliquée à une fonction
polynomiale



Interpolation

Relation entre T_j , V_{GE} et V_{CE} pour un courant donné

$$T_{j \text{ int}} = a_0 + a_1 V_{GE} + a_2 V_{GE}^2 + a_3 V_{CE} + a_4 V_{CE}^2 + a_5 V_{CE}^3 + a_6 V_{GE} V_{CE} + a_7 V_{GE}^2 V_{CE} + a_8 V_{GE} V_{CE}^2$$

Modification environnement entre calibrations et essais en ébullition libre :

- **Température ambiante** différente
- **Propriétés** composants électriques **modifiées**

Erreur maximale pendant l'ébullition libre:

$$1,1^\circ\text{C} + 0,9^\circ\text{C} = 2^\circ\text{C}$$



Interpolation Changement de température

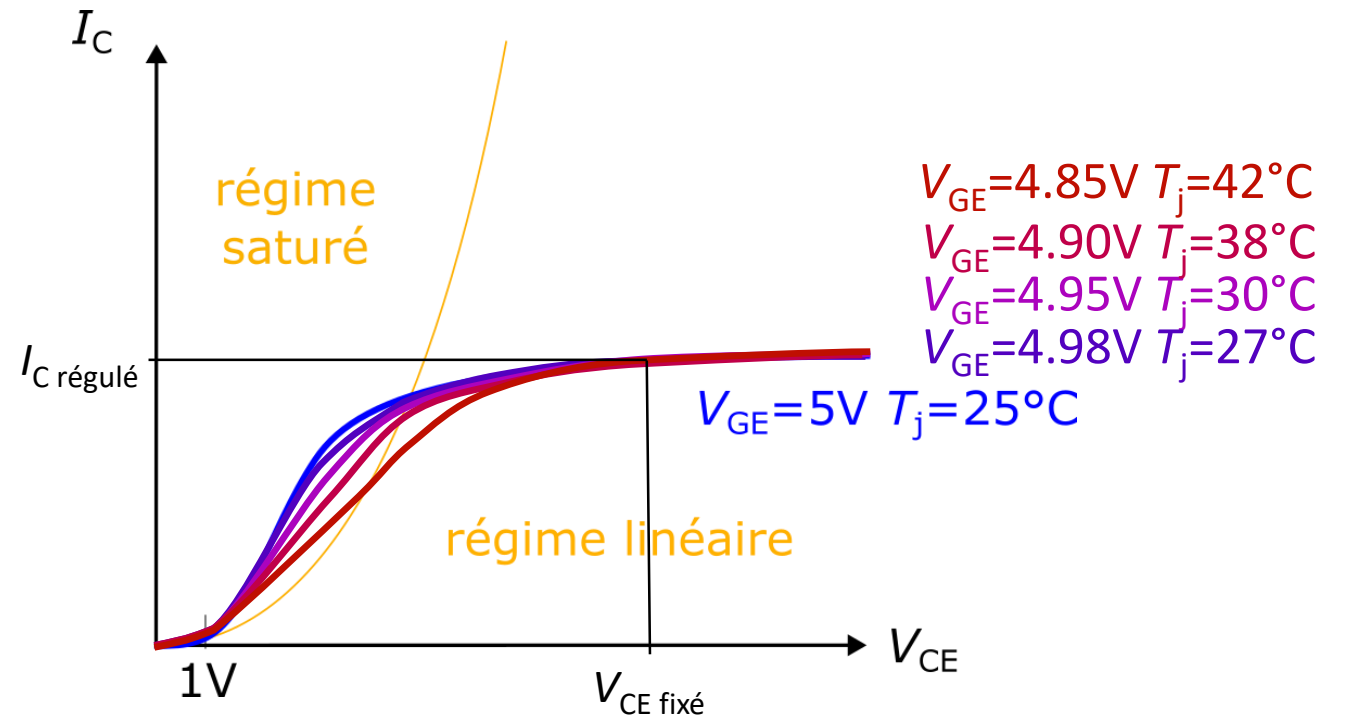
Intervalle de confiance à 95% entre la mesure et l'interpolation de $1,1^\circ\text{C}$

Méthode de mesure de la température

Conclusion

Cette méthode de mesure permet de:

- **Contrôler** la puissance dissipée
 - Régulation du courant
 - Tension V_{CE} imposée
- ⇒ **Mesure de température de jonction :**
 - ✓ Pendant l'échauffement avec une incertitude maximale de 2°C
 - ✓ A puissance dissipée constante
- Calculer en temps réel T_j pour protéger les transistors



SOMMAIRE

Conception du banc expérimental

Méthode de mesure de la température

Protéger les transistors de surchauffes

Régimes stationnaires et transitoires

Conclusion et perspectives

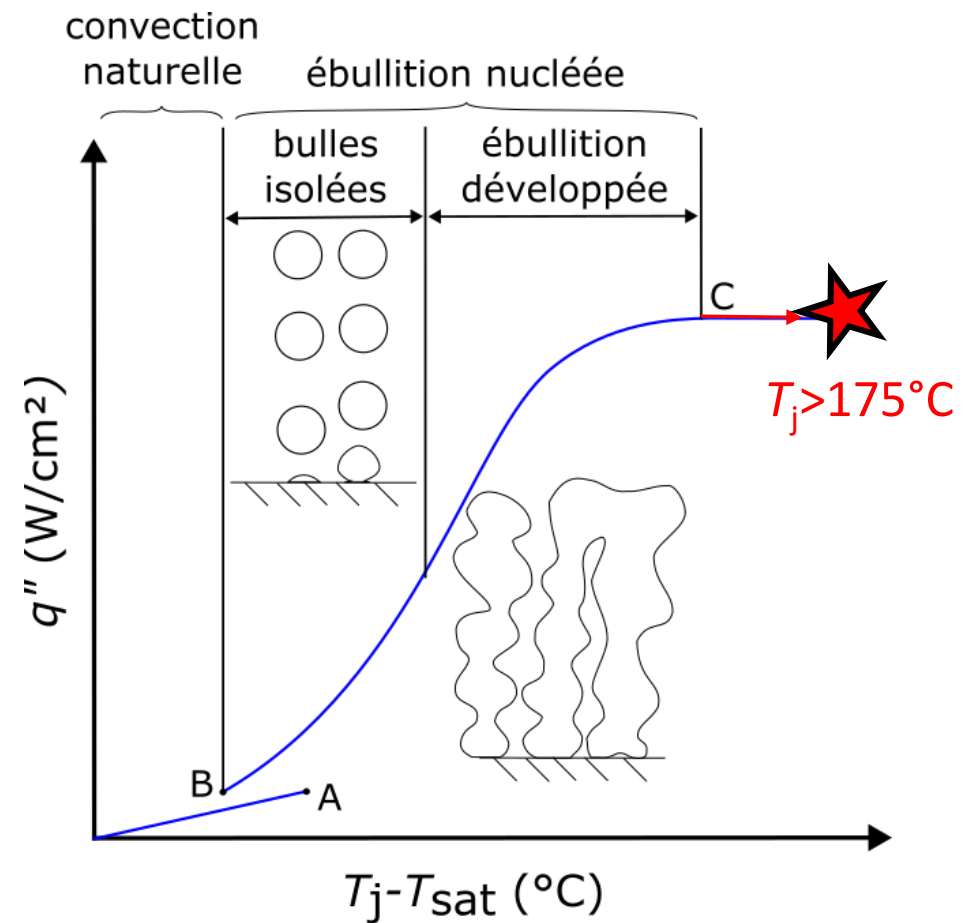
Protéger les transistors de surchauffes

Objectifs des caractérisations thermiques des dissipateurs

- Critères de comparaison des dissipateurs:
 - **Flux d'apparition** de l'ébullition nucléée
 - **Résistance thermique** $R_{th} = \frac{T_j - T_{sat}}{P}$
 - Le **flux critique**

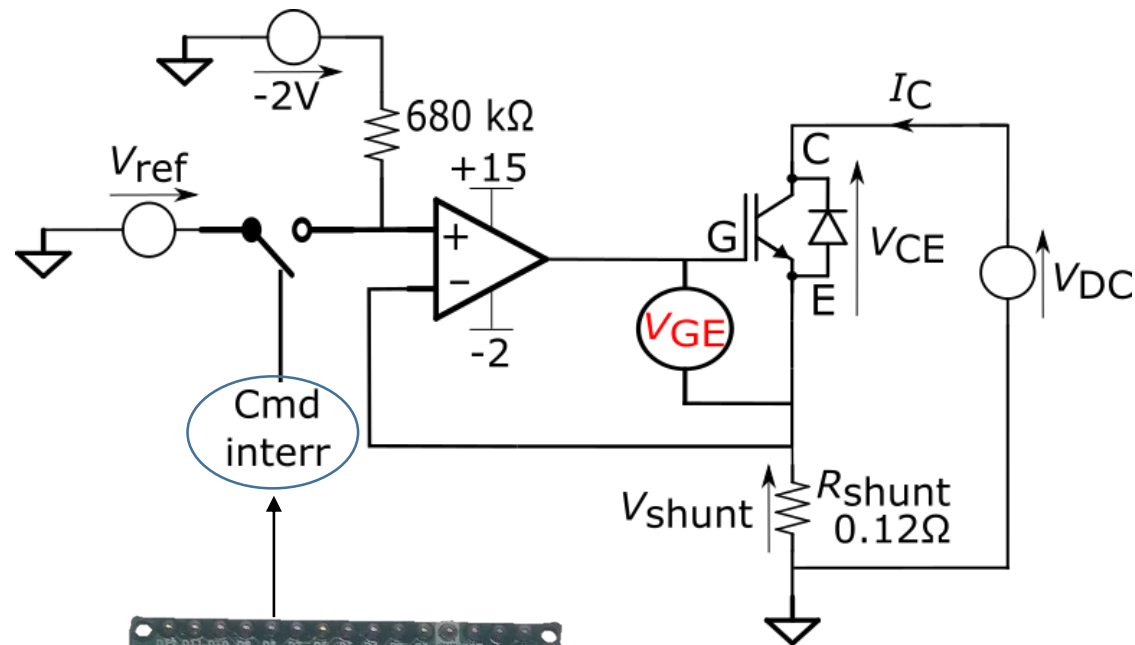
En étudiant le flux critique, T_j peut dépasser la température maximale admissible

➡ Mise en place d'une protection

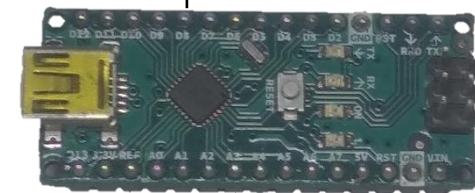


Protéger les transistors de surchauffes

Principe



Arduino
Nano



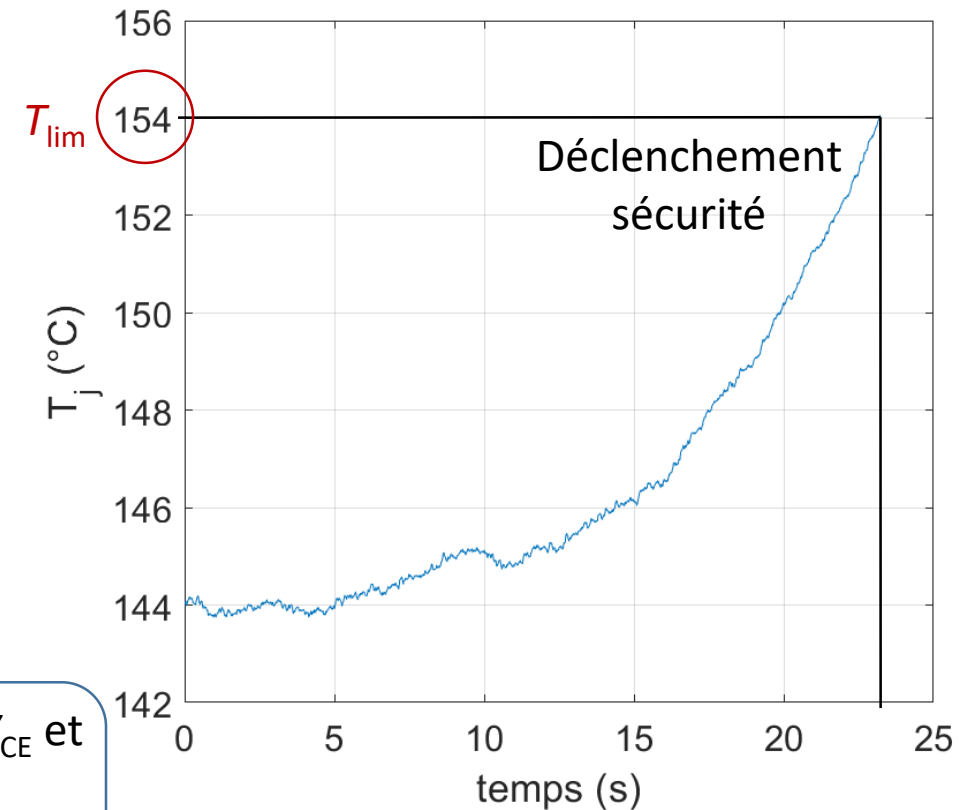
V_{GE}

V_{CE}

$T_{lim \text{ arduino}}$

- Calcule T_j avec les mesures de V_{GE} , V_{CE} et la fonction d'interpolation
- Compare T_j à $T_{lim \text{ arduino}}$
- Si $T_j > T_{lim \text{ arduino}}$ l'interrupteur est ouvert

$$T_{sat} = 50^\circ\text{C} - P = 82\text{ W} - T_{lim \text{ arduino}} = 160^\circ\text{C}$$



Protéger les transistors de surchauffes

Détection du flux critique

Conditions expérimentales

$$T_{\text{lim}} = 160\text{ °C} \quad (T_{\text{lim arduino}} = 165\text{ °C})$$

Dernière mesure stable:

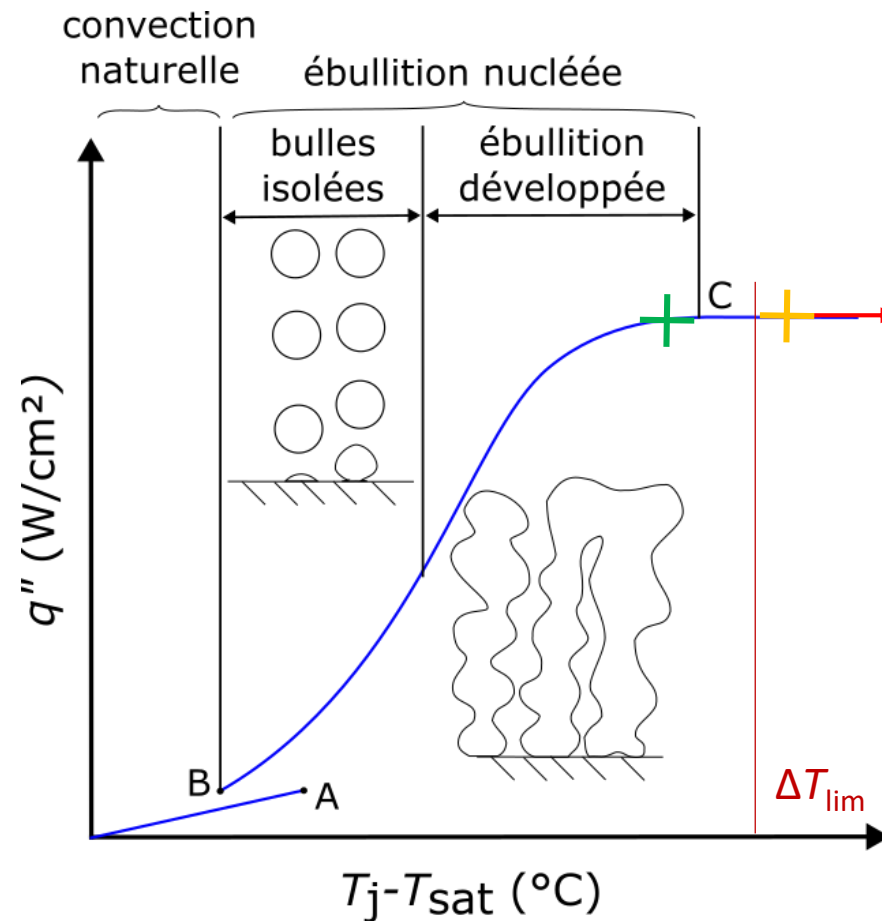
$$P = 80\text{ W}$$

$$T_j = 145\text{ °C}$$

Dernier incrément de puissance:

$$P = 82\text{ W}$$

$$T_j > T_{\text{lim}}$$



- Dernière mesure stable :
 T_j inférieure à T_{lim} d'au moins 10°C
 - Dernier incrément de puissance:
 - Faible incrément
 - T_j atteint T_{lim}
- ➡ Flux critique détecté

Protéger les transistors de surchauffes

Détection du flux critique

Conditions expérimentales

$$T_{\text{lim}} = 160\text{ °C} \quad (T_{\text{lim arduino}} = 165\text{ °C})$$

Dernière mesure stable:

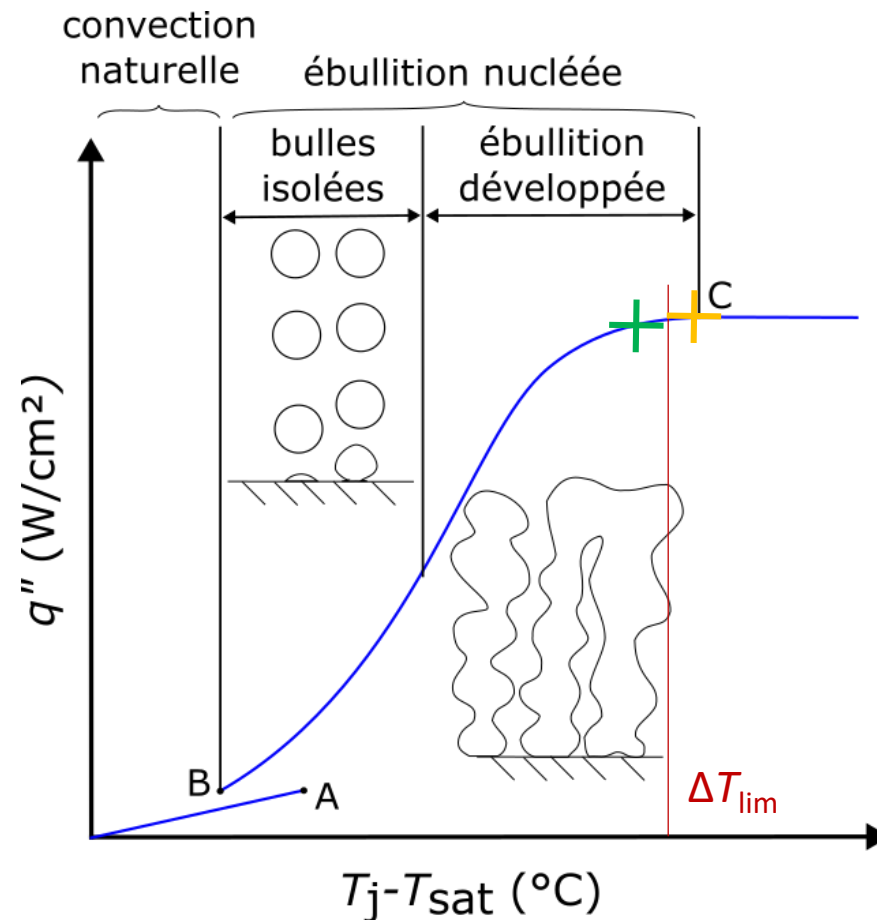
$$P = 80\text{ W}$$

$$T_j = 155\text{ °C}$$

Dernier incrément de puissance:

$$P = 82\text{ W}$$

$$T_j > T_{\text{lim}}$$



- Dernière mesure stable:
 T_j proche de T_{lim}
- Dernier incrément de puissance:
 - Faible incrément
 - T_j atteint T_{lim}

➡ Déclenchement
provoqué soit par :

- Flux critique
- R_{th} trop élevée



Protéger les transistors de surchauffes

Conclusion

- Calcul **en temps réel** de la température **par un microcontrôleur**.
- Le **composant est ouvert** si la température calculée atteint une limite
- Grâce à la protection, le **flux critique peut être détecté**:
 - ✓ si la **sécurité se déclenche** suite à **un faible incrément de puissance**
 - ✓ **Dernière température** de jonction **stable loin de la limite** en température.

SOMMAIRE

Conception du banc expérimental

Méthode de mesure de la température

Protéger les transistors de surchauffes

Régimes stationnaires et transitoires

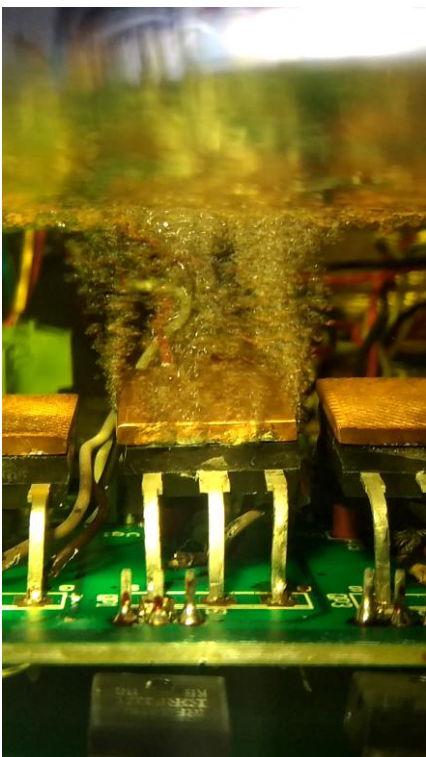
Conclusion et perspectives

Régimes stationnaires et transitoires

Régime stationnaire

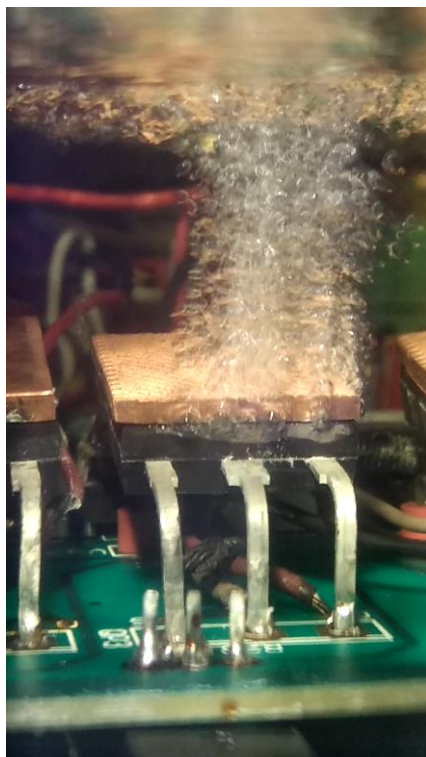
Mesure de V_{GE} et V_{CE} en régime permanent pour différentes puissances dissipées

Dissipateur lisse

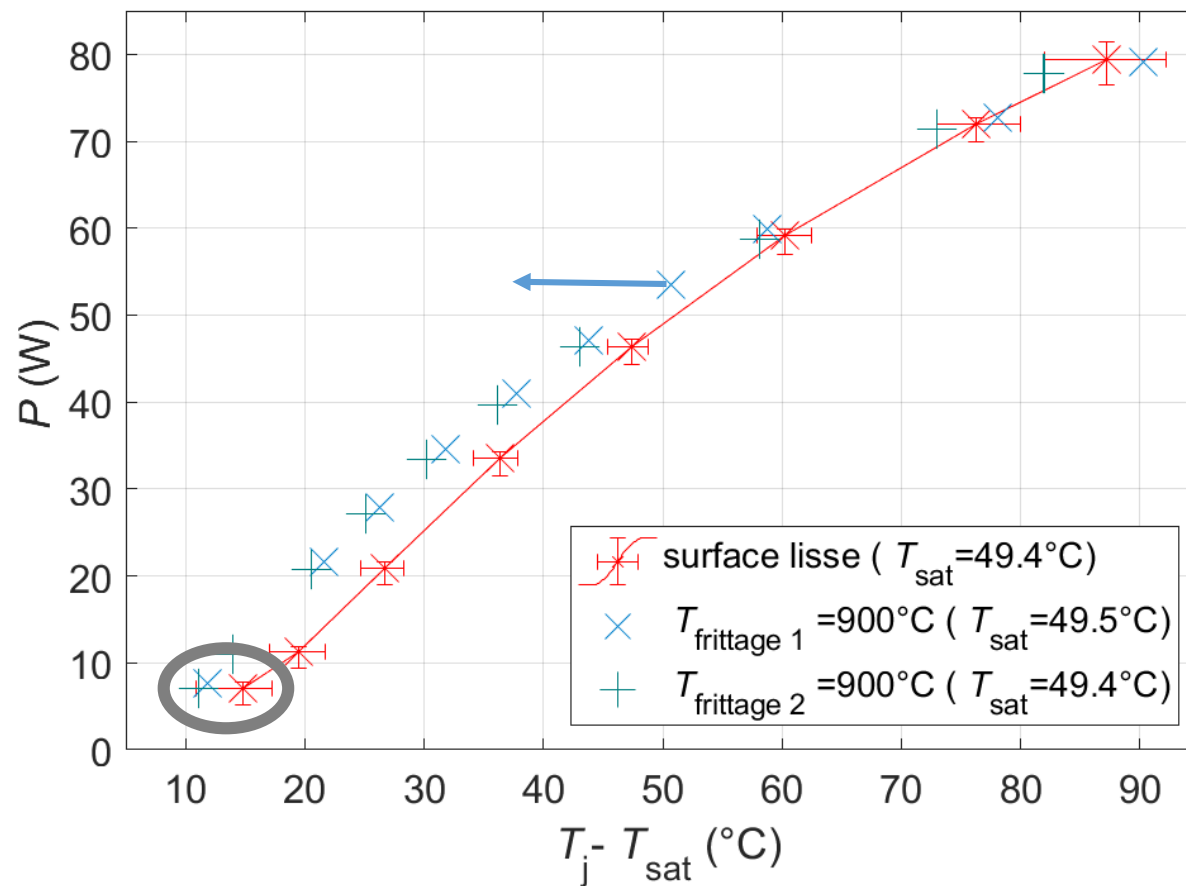


- Convection naturelle
- Sites actifs sur le pourtour

Dissipateur fritté à 900°C



- Convection naturelle
- Ébullition partielle en régime de bulles isolées

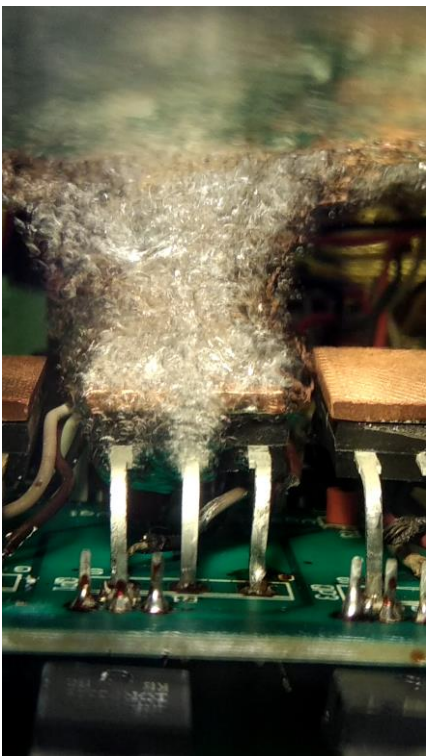


Régimes stationnaires et transitoires

Régime stationnaire

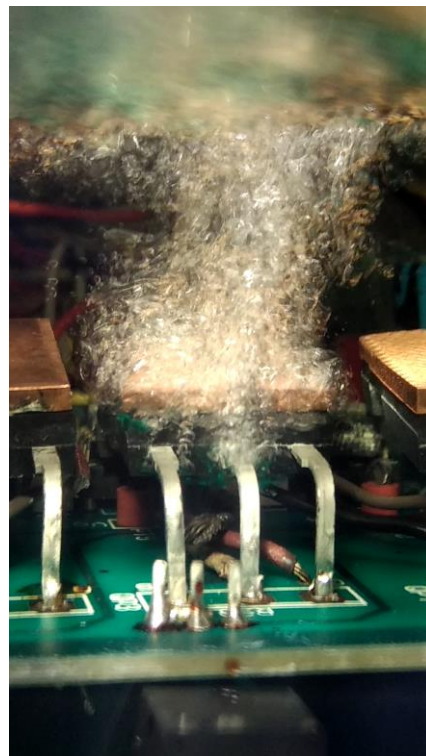
Mesure de V_{GE} et V_{CE} en régime permanent pour différentes puissances dissipées

Dissipateur lisse

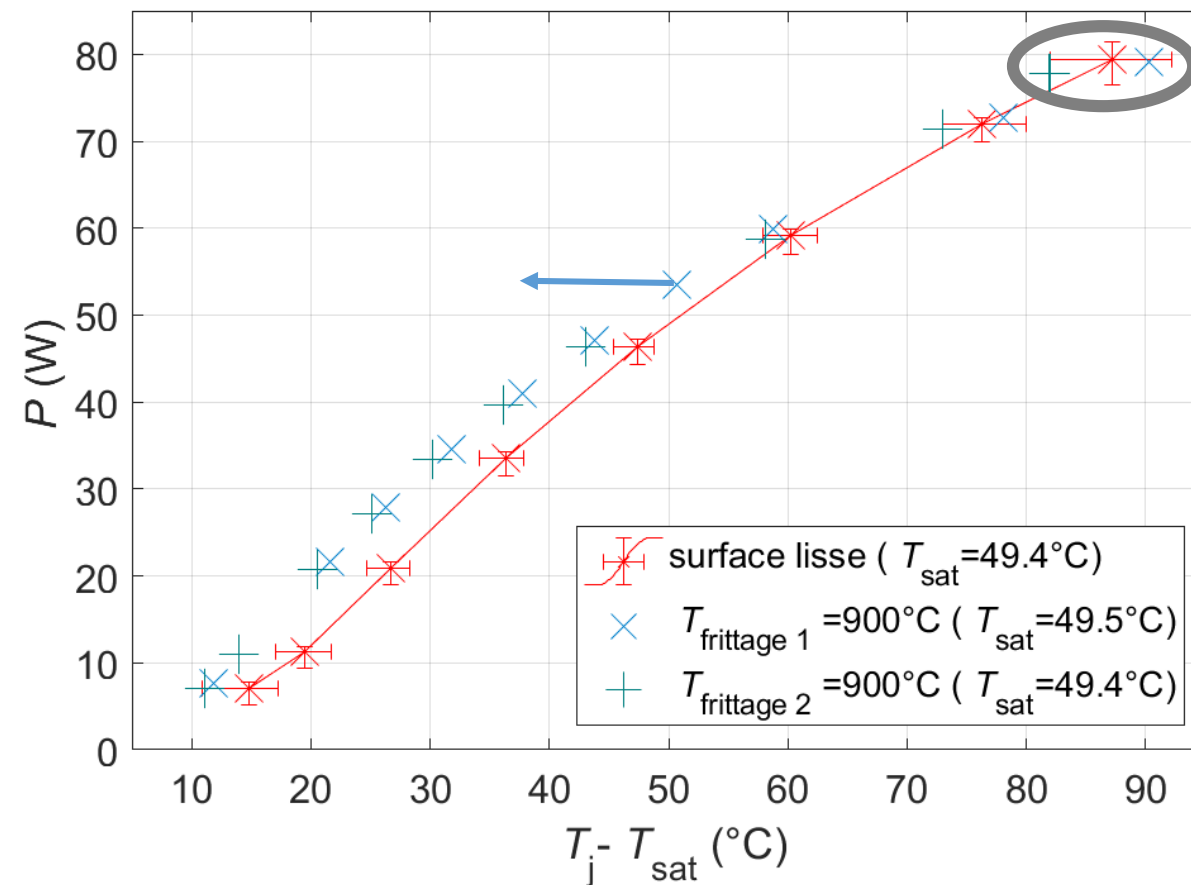


- Ébullition développée
- Mouvements convectifs intenses

Dissipateur fritté à 900°C

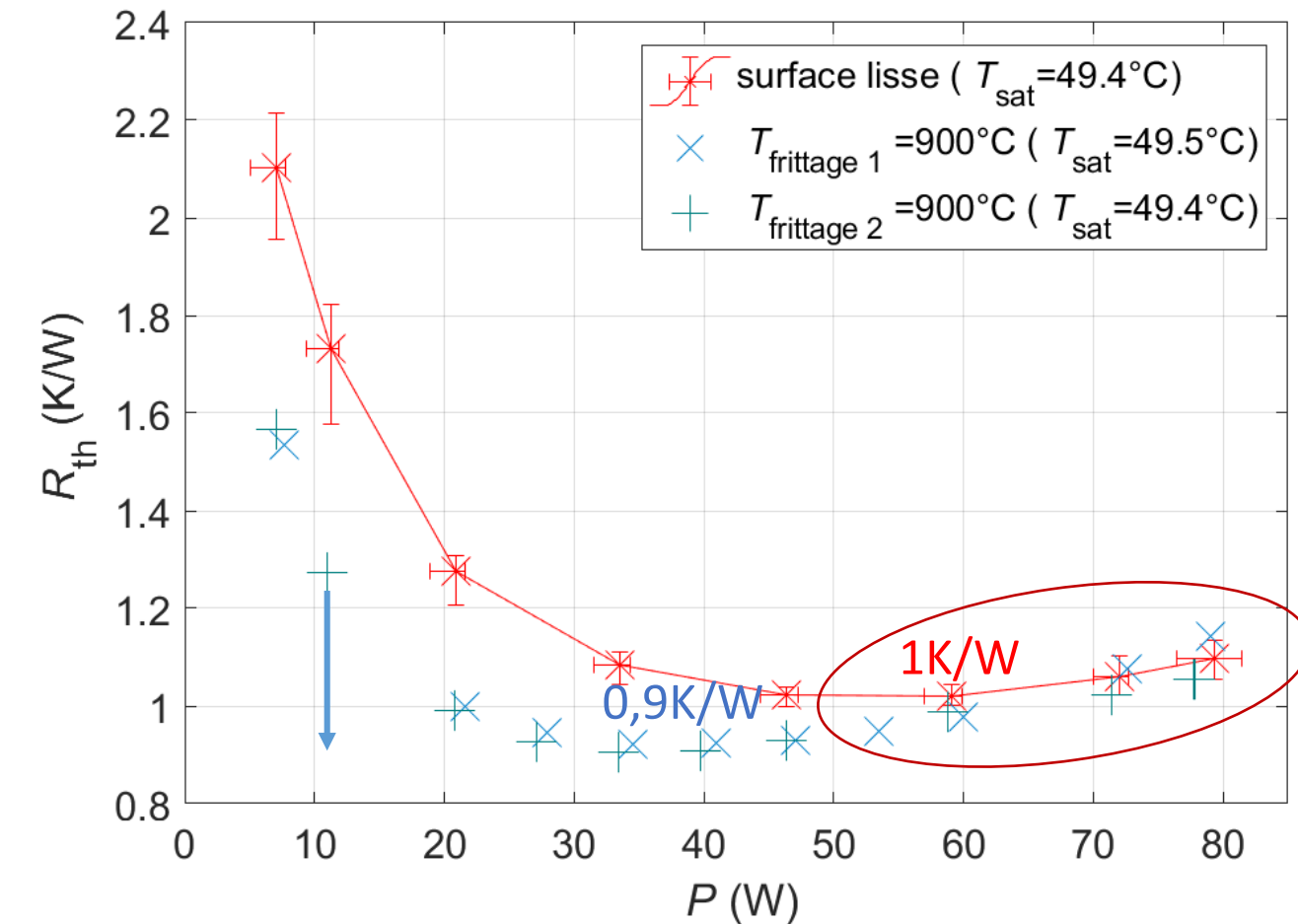


- Ébullition développée
- Mouvements convectifs intenses



Régimes stationnaires et transitoires

Régime stationnaire

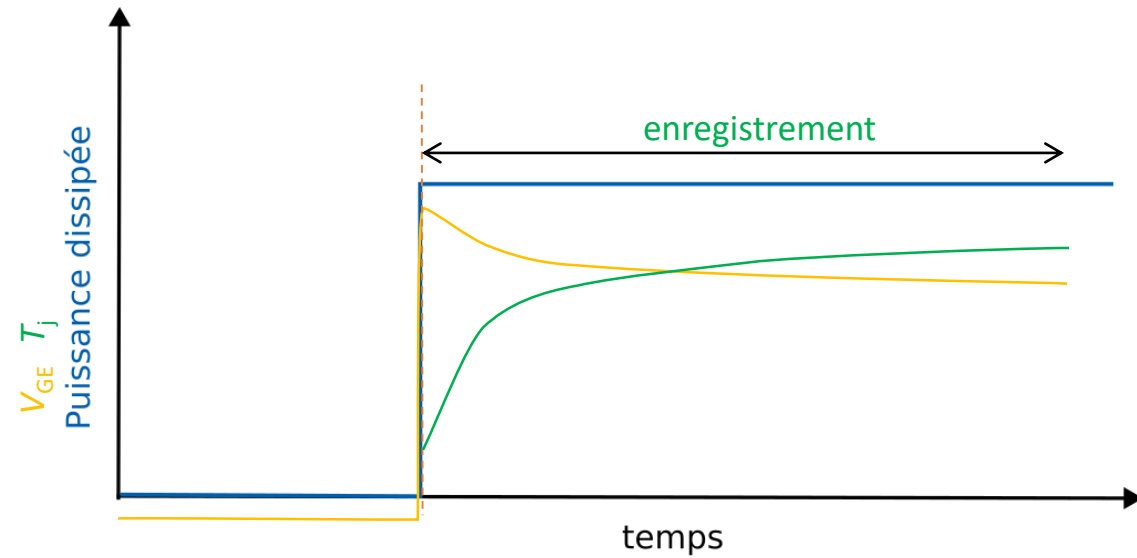


Bilan de la structuration en régime stationnaire

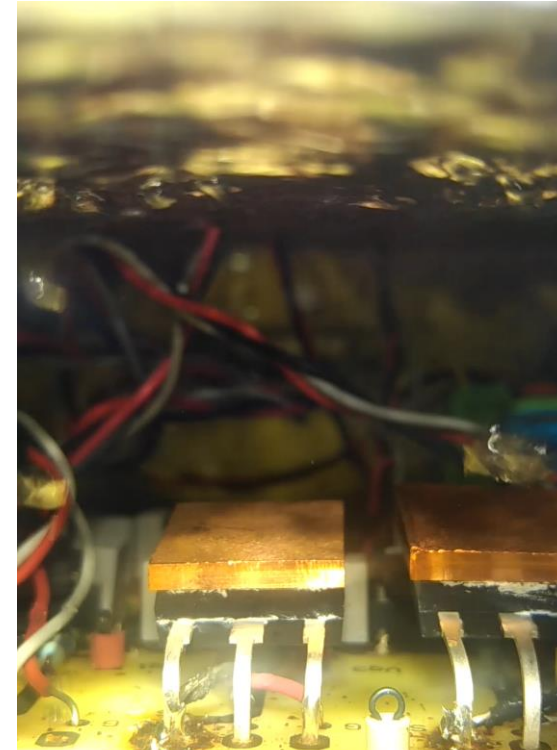
- Transferts de chaleur $\nearrow$ à faible et moyen flux de chaleur $\longrightarrow$ $\searrow$ de R_{th}
- Performances thermiques **similaires à forts flux**:
 - **Conductivité thermique** équivalente plus **faible**
 - **Meilleurs** transferts de chaleur liés à **l'ébullition**

Régimes stationnaires et transitoires

Transitoires en partant d'une puissance nulle

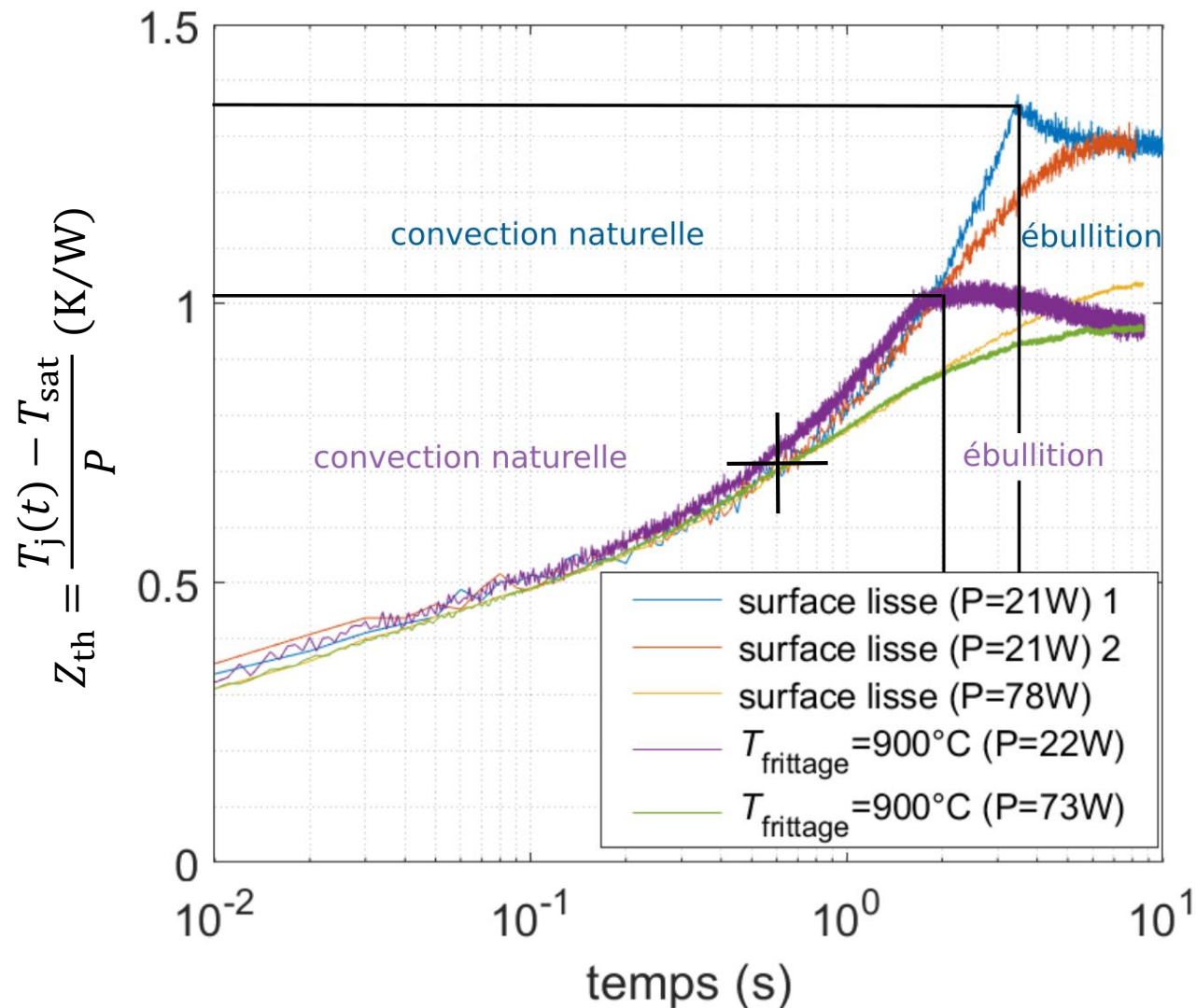


- Mesure de V_{GE} et V_{CE} au moment du changement de puissance
- **Visualisation:** convection naturelle puis propagation de l'ébullition



Régimes stationnaires et transitoires

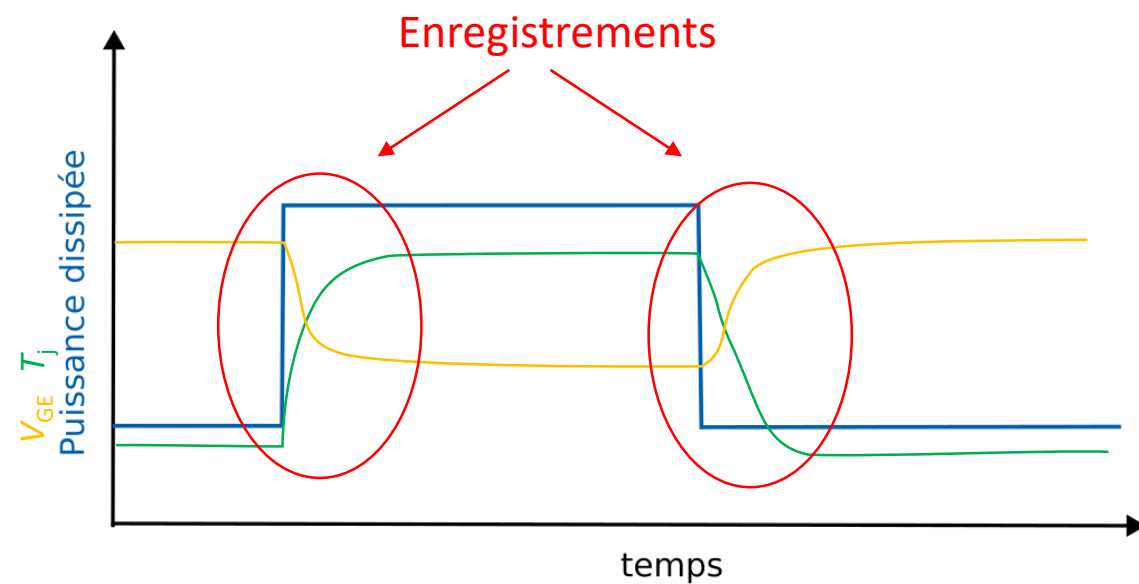
Transitoires en partant d'une puissance nulle



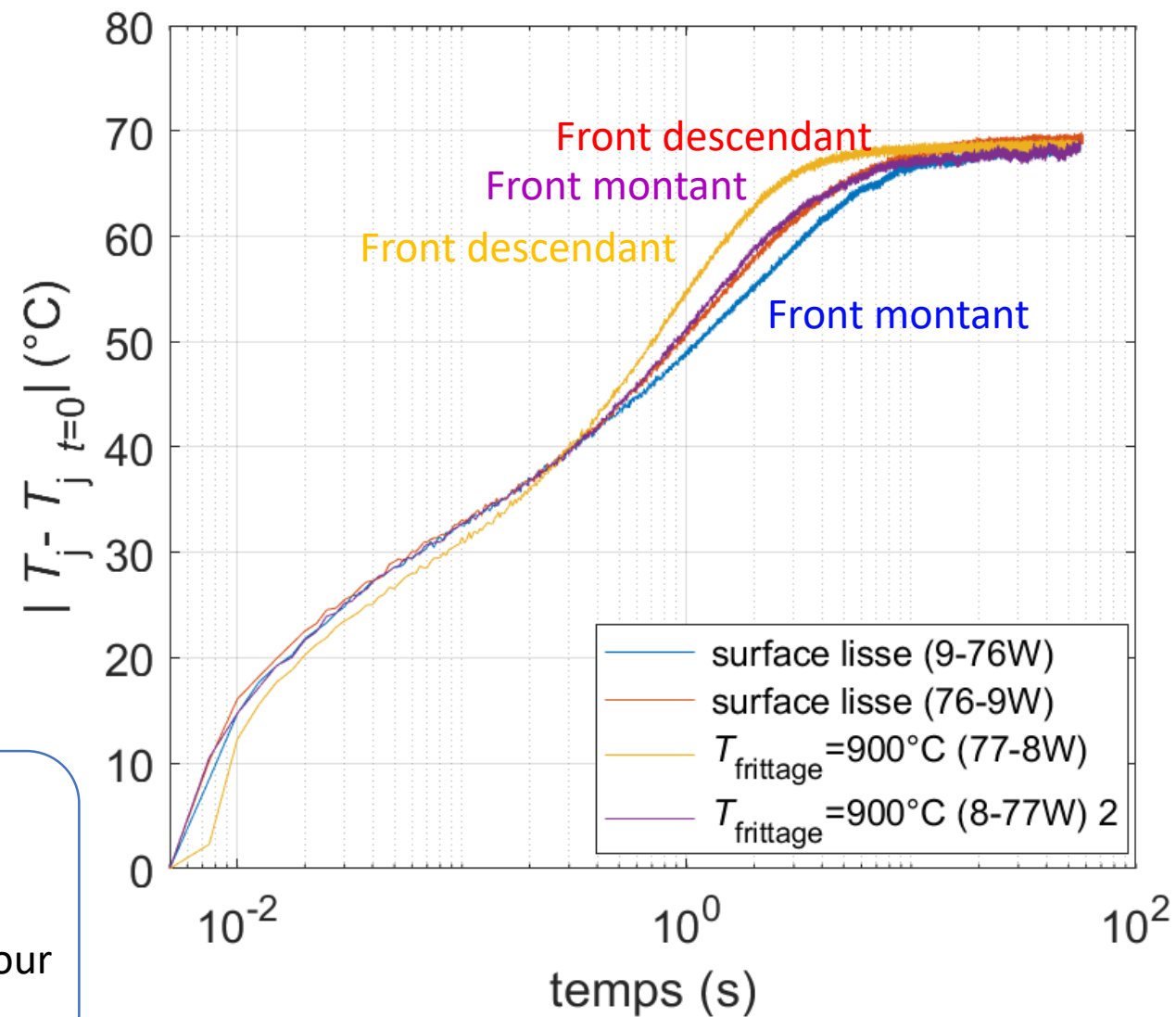
- **Impédance commune** jusqu'à 600 ms
- Impédance **plus faible** à forte puissance:
⇒ **régime d'ébullition plus développé**
- A faibles puissances dissipées:
 - **Dépassement de température uniquement** lors du **premier échelon** pour le dissipateur lisse
⇒ Sites de nucléation déjà activés lors du second échelon
 - Impédance **plus faible** avec structuration
⇒ **Sites de nucléation plus facilement activés**
 - **Dépassement de température systématique** avec la structuration

Régimes stationnaires et transitoires

Transitoires en partant d'une puissance non nulle



- Etude en **front montant** et **descendant**
- Réponse plus **rapide** pendant le front **descendant**
- Réponse plus **rapide** et avec le **dissipateur structuré**
- **Dépassement** de température après un **long repos** pour le **dissipateur fritté**



- La **caractérisation** des dissipateurs en **régime stationnaire** a montré que **la structuration**:
 - **Améliore** les transferts de chaleur à **bas et moyen flux** jusqu'à 20%
 - Permet **un début d'ébullition nucléée** pour de **plus faibles surchauffes**
- **Des comportements thermiques** différents ont été mis en évidence par **la caractérisation** en **régime dynamique** :
 - ⇒ **Les dépassements de température** observés peuvent **impacter la durée de vie** des composants
 - ⇒ L'étude en **régime dynamique** est **complémentaire** à l'étude en **régime stationnaire**

SOMMAIRE

Conception du banc expérimental

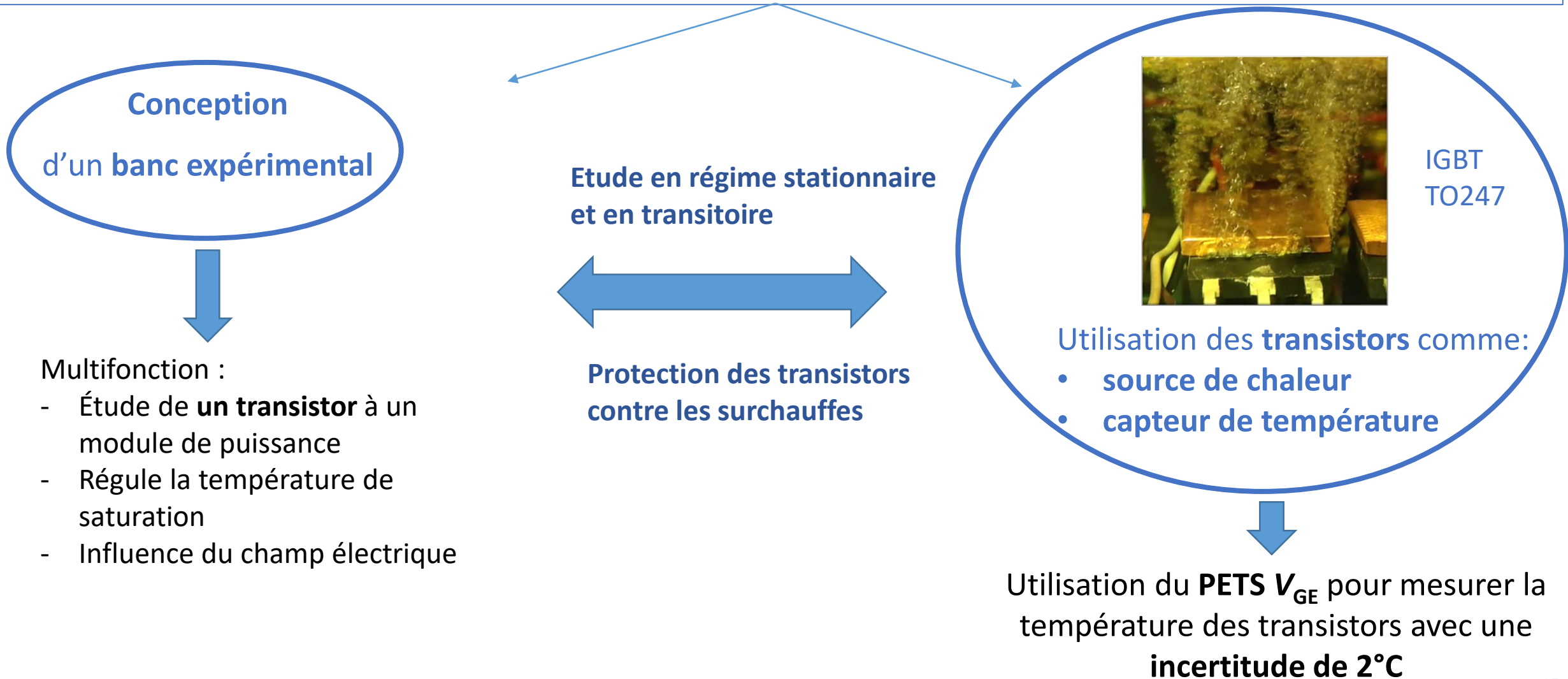
Méthode de mesure de la température

Protéger les transistors de surchauffes

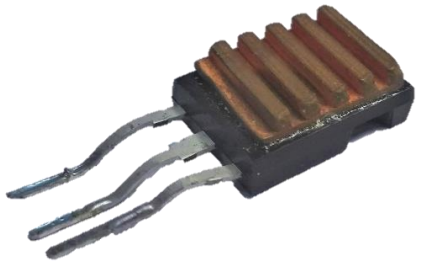
Régimes stationnaires et transitoires

Conclusion et perspectives

Caractériser le refroidissement par **ébullition libre** en **approchant le fonctionnement normal** des **modules de puissance**



Améliorer les transferts de chaleur par ébullition libre
par **structuration de surface**



Fabrication de dissipateurs structurés par impression 3D et frittage
⇒ Différentes température de frittage



Caractérisation thermique et imagerie MEB des dissipateurs structurés

- **Améliore les transferts de chaleur** à bas et moyen flux
- Étude des **transitoires thermiques complémentaires aux régimes stationnaires** (observations de dépassements de température)

Inconvénients du banc de caractérisation:

- **Calibration de chaque transistor** ➡ **Fonction d'interpolation générique** pour un modèle de composant
- Cette méthode de mesure ne peut être **utilisée lors du fonctionnement normal d'un convertisseur**
- **Etude** des dépassements de température **délicate : activation** des sites de nucléation lors de **préréglage de la puissance dissipée**

- **Adapter la mise en œuvre** du PETS V_{GE} pour **l'utiliser sur d'autres transistors**
- **Choix d'un meilleur fluide** pour la santé et l'environnement
 - Propriétés diélectriques
 - Propriétés thermodynamiques
- Étude approfondie de **la structuration**
 - **Impression 3D : répétabilité** de la méthode fabrication, conductivité thermique équivalente, porosité, différentes géométries et paramètres d'impression
 - **Dissolution sélective** : créer une structuration à porosité ouverte **en enlevant chimiquement un composé d'un matériau composite**
- Étude des **champs électriques** présents dans un convertisseur pour **intensifier les transferts de chaleur**
- Étudier la **disposition des transistors** pour la **conception d'un module de puissance**



Merci pour votre attention