



# Onduleur SiC Avancé : Un Outil Puissant pour la Caractérisation et l'Optimisation des Machines Électriques

Alexandre BATTISTON, IFPEN  
Idir ARSLANE, CRITTM2A

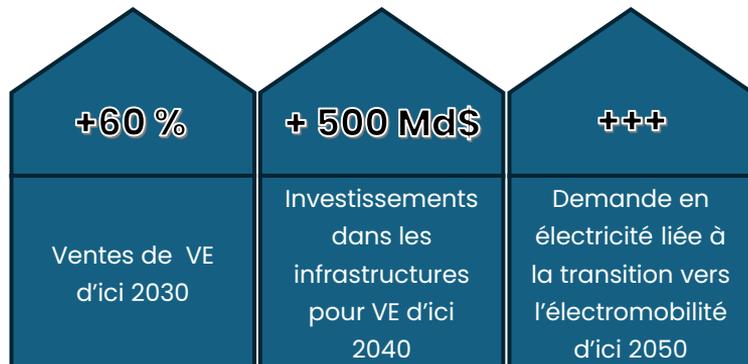
SyTec 2025,  
07/10/2025

- Contexte et Objectifs
- Fondations et Technologie
- Applications
- Résultats Expérimentaux
- Conclusion



# Contexte & Objectifs

## » Quelques chiffres



## » Les challenges

- ↗ rendement
- ↗ gestion thermique
- ↘ de composants / matériaux
- Énergie plus durable
- Zéro émission
- ↗ de sécurité
- ↘ de bruit
- Commande plus précise

Optimisation et protection des batteries  
Véhicules connectés  
Conduite autonome  
Nouveaux matériaux  
IA  
Nouvelles stratégies de commande  
Nouvelles architectures de conversion d'énergie

## » Une solution possible

Développement de l'électronique de puissance pour la conception et les essais de nouveaux produits.

## Composants grand gap (WBG) : révolution dans l'électronique de puissance.

- Excellentes performances
- Propriétés physiques améliorées

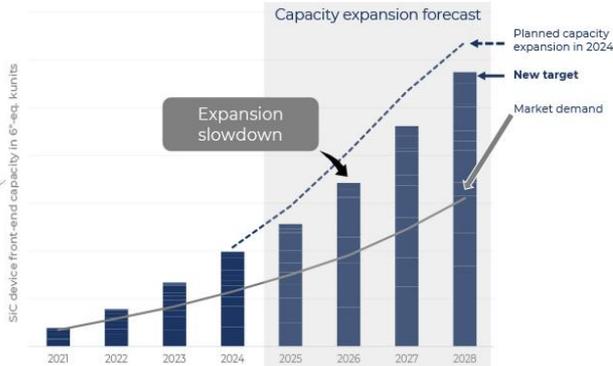
## Verrous technologiques : levés ou en voie de l'être.

2021-2028 SiC device capacity forecast of key players

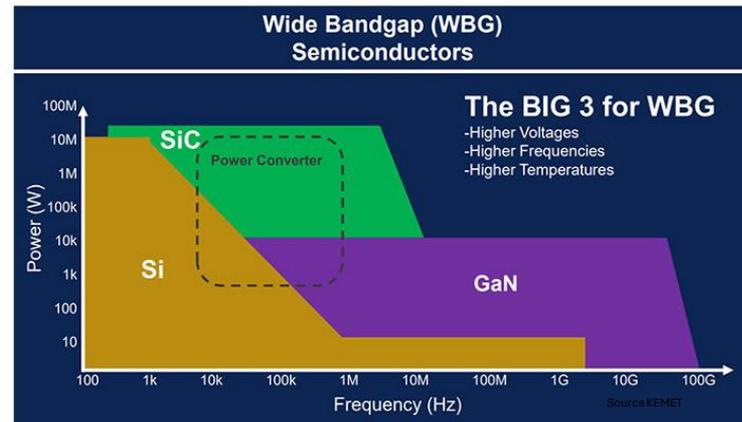
(Source: Power SiC 2025 - Markets and Applications, Yole Group, May 2025)



onsemi



## Wide Bandgap : la nouvelle frontière de l'électronique de puissance,



## Le « BIG 3 » des technologies WBG

- Tensions plus élevées
- Fréquences de commutation plus élevées
- Températures plus élevées

# Contexte et Objectifs

Idées

+ savoirs

+ expertise

Connaissance  
du marché et  
des besoins en  
essais

Collaboration /  
intégration  
dans des  
projets de  
recherche

Développement d'un  
onduleur adaptatif et  
polyvalent pour des  
applications sur banc  
d'essai

# Fondements & Technologie

## » Un onduleur triphasé polyvalent 800 V pour applications sur banc d'essai

- Haute puissance et haut rendement, jusqu'à 50 kHz de fréquence de commutation
- Commande de la vitesse, du couple, du courant et de la tension pour des applications haute performance
- Protections en roue libre et court-circuit actif pour une utilisation sécurisée sur banc d'essai
- Technologie au carbure de silicium (SiC)

## » Commercialisé par la PME française Alphée

<https://alpee.engineering/>

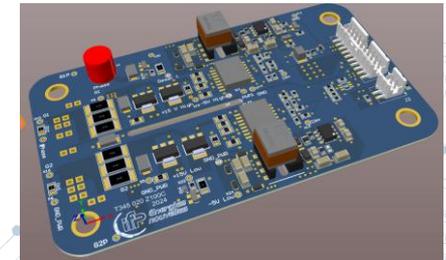
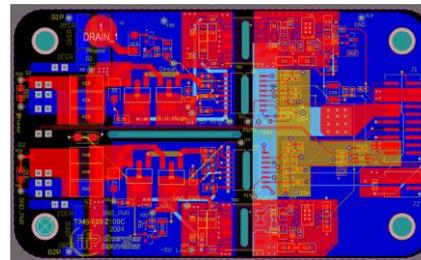
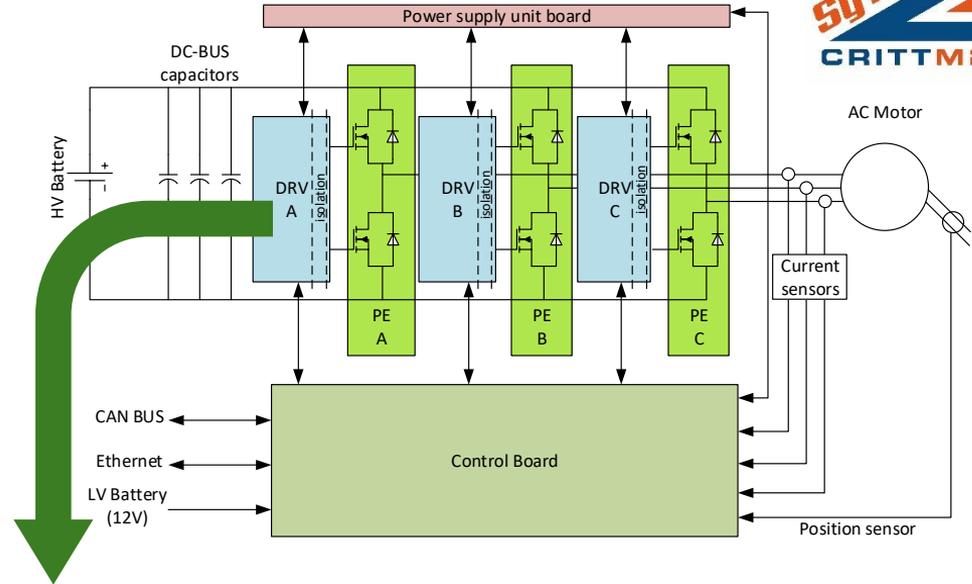


## » Spécifications

Puissance pic	320 kW
Puissance nominale	250 kW
Tension nominale DC	750Vdc
Courant DC maximum	350 Adc
	750 Apk
Courant AC maximum	(500Apk continu)
Fréquence de découpage	10 - 50 kHz
Technologie	Mosfets Full-SiC
Rendement	99% (large plage)
Poids	15,7 kg

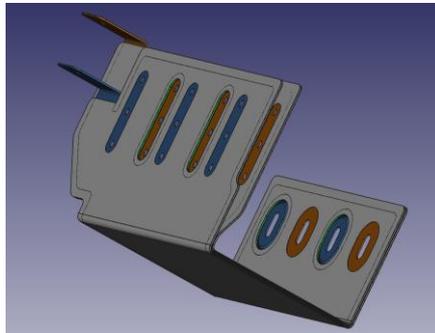
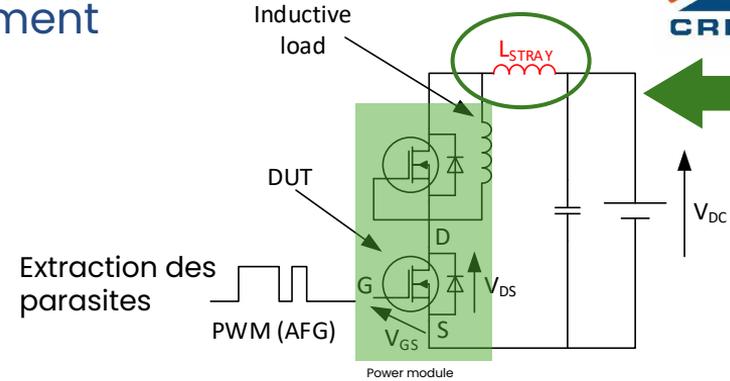
## » Conception basée sur une topologie à 2 niveaux avec intégration mécanique

- Mise en œuvre de modules de puissance SiC
- Conception et fabrication des cartes drivers (DRVA, DRVB, DRVC) et des alimentations associées
- Conception et fabrication du busbar DC laminé,
- Intégration d'une carte de commande IFPEN
- Calculs thermiques et validations
- Conception du boîtier mécanique



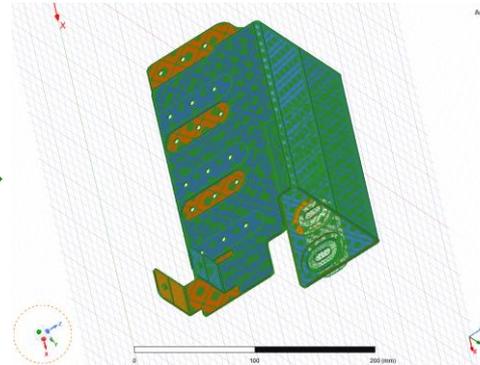
## Busbars DC laminés pour un fonctionnement haute performance et fiable

- Réduction de l'inductance parasite de boucle DC pour réduire les surtensions en commutation des composants SiC
- Evaluation de la réduction par éléments finis et extraction paramétrique



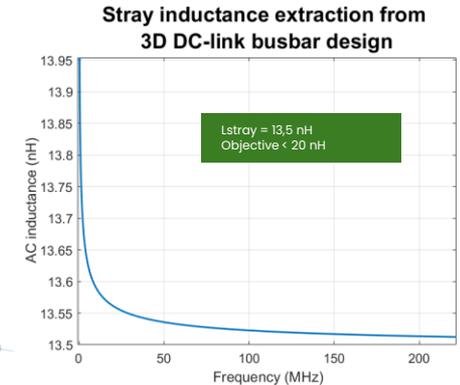
Plan mécanique 3D des busbars DC

Analyse par  
Eléments  
finis



Maillage et calculs

Extraction des  
paramètres



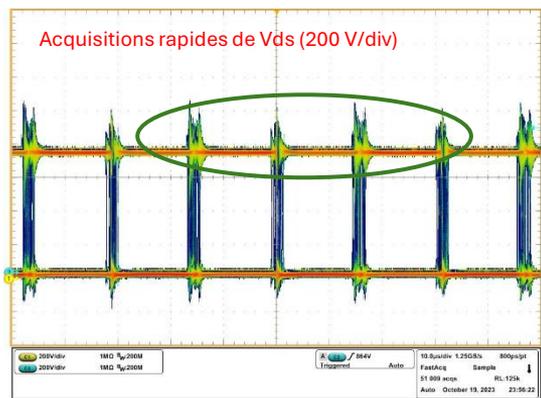
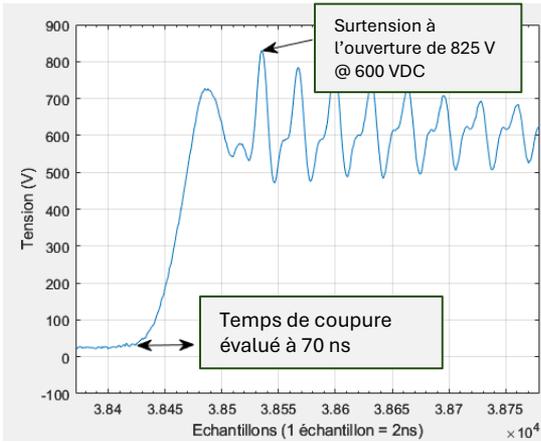
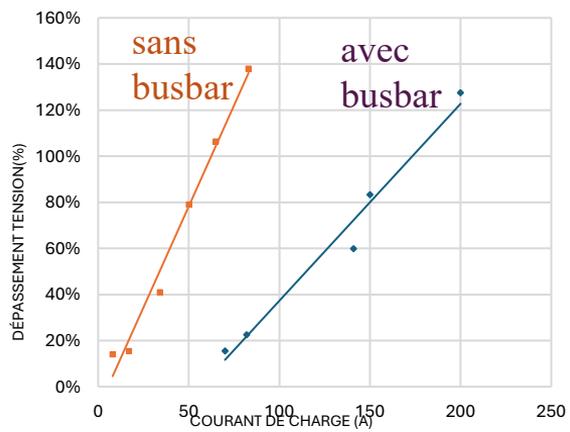
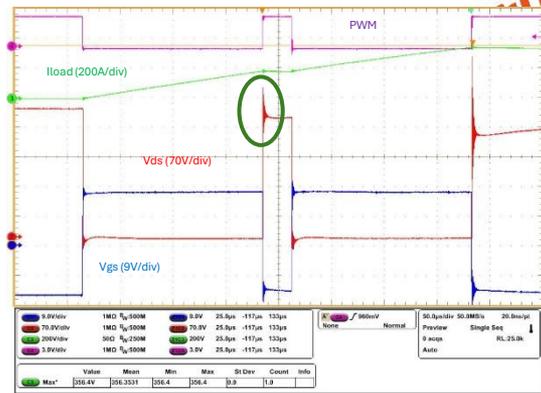
# Innovations technologiques



## » Busbars DC laminés pour un fonctionnement haute performance et fiable

Évaluation des surtensions à la coupure selon deux méthodologies :

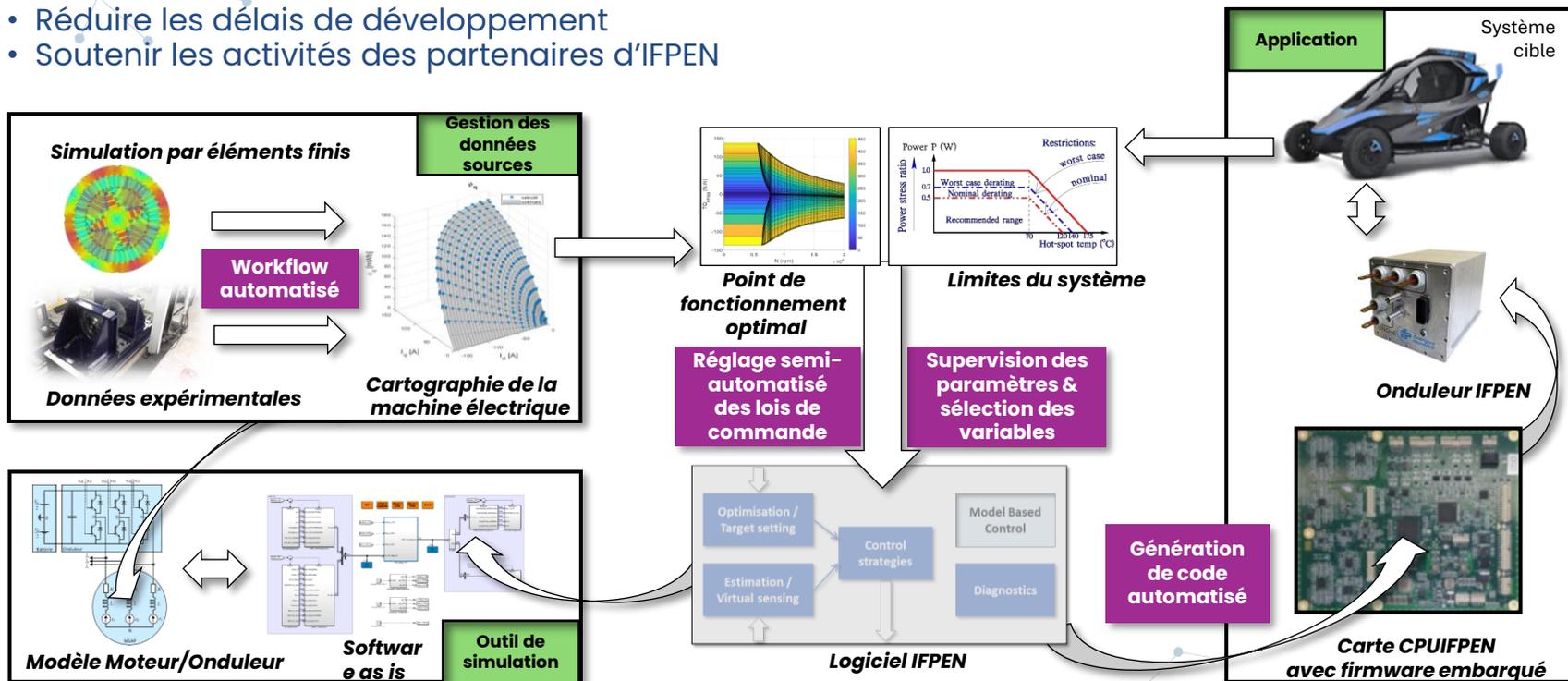
- Test à double impulsion (Double Pulse Test)
- Test de cyclage de puissance (Power Cycling Test) sur charge sinusoïdale AC



Évaluation des surtensions (PCT) @ 700 V, 400 A

## » IFPEN a développé une chaîne complète d'outils de contrôle pour les chaînes de traction électriques,

- Réduire les délais de développement
- Soutenir les activités des partenaires d'IFPEN



# Applications

## » Une solution complète, flexible et performante

- Matériel & logiciel intégrés, associés à une chaîne d'outils de contrôle avancés pour l'e-drive.
- Compatibilité multi-topologies :
  - Machine synchrone à aimants permanents (PMSM)
  - Machine synchrone à réluctance assistée par aimants permanents (PMA-SynRM)
- Capacités de test étendues : caractérisation électrique et thermique des machines jusqu'à leurs limites de performance.

Une plateforme polyvalente pour la recherche, le développement et la validation des chaînes de traction électriques.

# Le Projet RedHat

## » RedHat ?

RELIability and High Torque and power density motor



## » Objectifs

Rendement des chaînes de conversion électromécanique,  
Amélioration de la densité de couple et de puissance,  
15 kW/kg et 12 Nm/kg

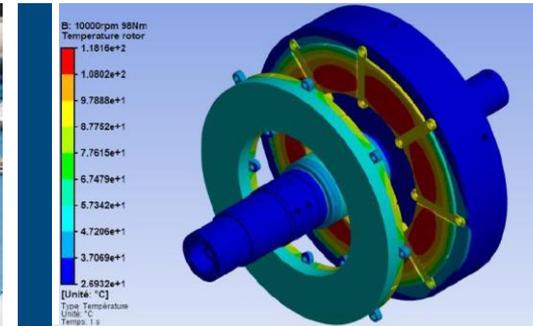
## » La machine électrique

Machine synchrone à aimants permanents à flux axial  
Economique et compacte  
Aimants permanents en surface (SmCo)  
Double rotor  
Paires de pôles : 4 / Dents : 12  
Puissance mécanique maximale : 188 kW  
Couple maximal : 183 Nm  
Vitesse maximale : 10 000 tr/min  
Puissance massique : 12 kW/kg  
Refroidissement liquide dans le rotor et le stator  
Innovation dans la forme des tôles magnétiques  
Innovation dans le choix des matériaux

## » Consortium



Onduleur SiC  
IFPEN



MSAP AF  
RedHat

# Résultats Expérimentaux

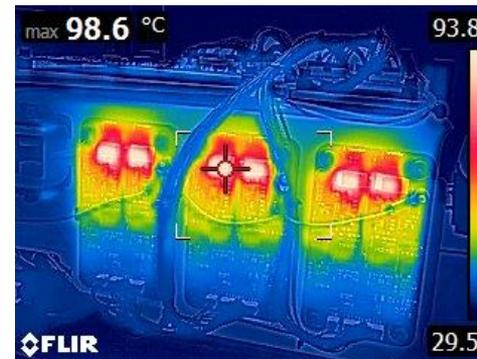
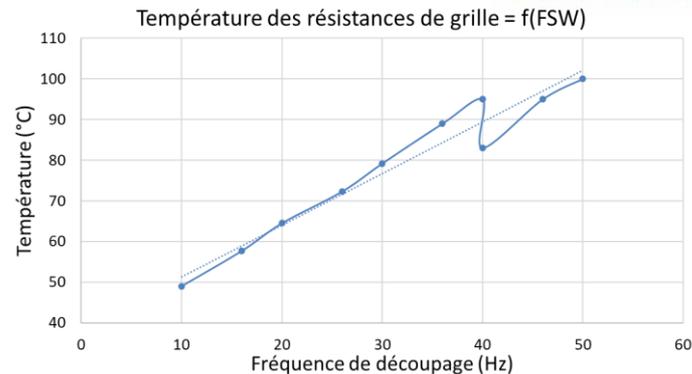
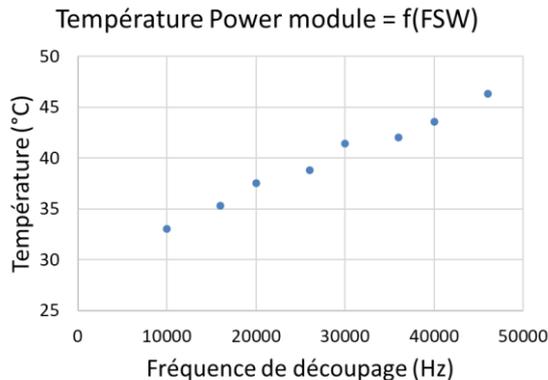
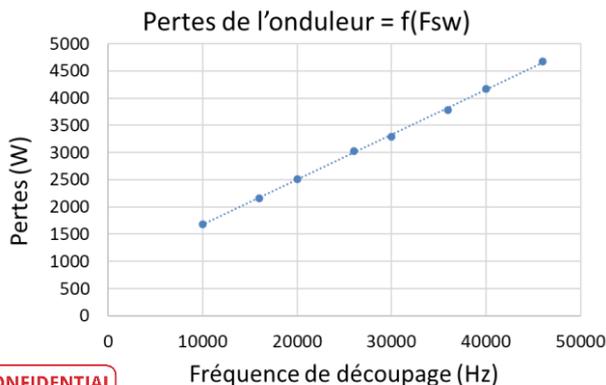
## » Test haute fréquence de commutation

Conception des drivers de grille pour fonctionner à  $F_{sw} = 50$  kHz

Résistances de grille dimensionnées pour permettre :

- Un fort taux de montée (dv/dt) et une réduction des pertes de commutation
- Des commutations rapides

Évaluation des pertes de l'onduleur en fonction de la fréquence de commutation ( $F_{sw}$ ) et analyse thermique,



Mesure thermique infrarouge des résistances de grille @  $F_{sw} = 50$  kHz

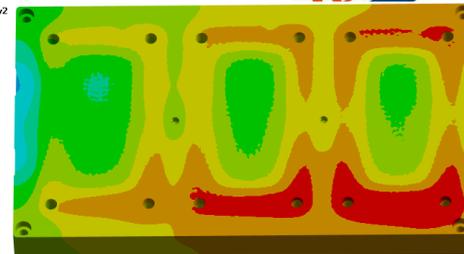
## » Analyse thermique

- Simulations 3D par éléments finis (FEA)
- Évaluation des performances de la plaque froide aux pertes maximales des modules de puissance
- Banc d'essais dédié au Power Cycling Test (PCT) pour l'évaluation du comportement thermique des modules de puissance (module ouvert)

E:Steady-State Thermal v2

COLDPLATE  
Type: Temperature  
Unit: °C  
Time: 1 s  
10/08/2023 14:49

24.744 Max  
70.119  
65.535  
60.931  
56.327  
51.723  
47.119  
42.515  
37.911  
33.307 Min

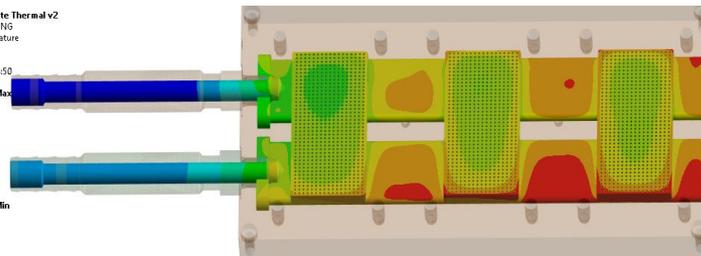


Bonne répartition thermique autour des modules

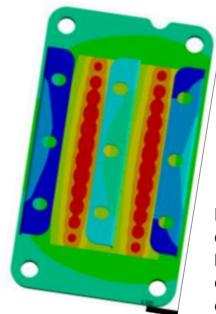
E:Steady-State Thermal v2

MICROCOOLING  
Type: Temperature  
Unit: °C  
Time: 1 s  
10/08/2023 14:50

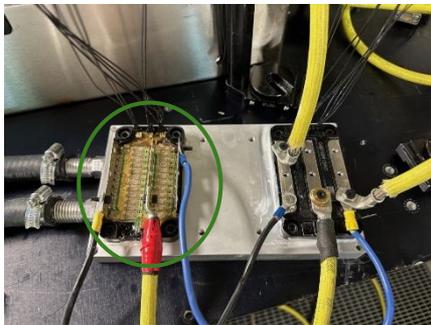
68.109 Max  
61.332  
58.555  
53.778  
49.001  
44.225  
39.448  
34.671  
29.894  
25.117 Min



Validation des performances du système de refroidissement eau glycolée à 10 L/min



Modélisation thermique 3D du module de puissance basée sur les données constructeur et les données expérimentales

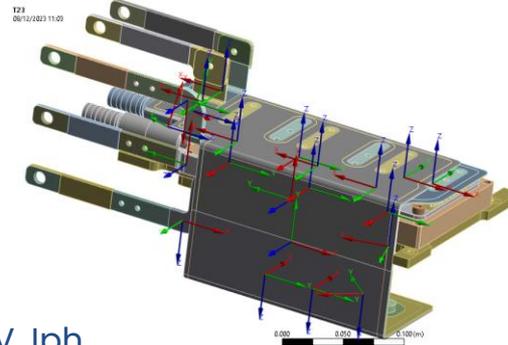


Module ouvert sur plaque froide pour l'évaluation thermique

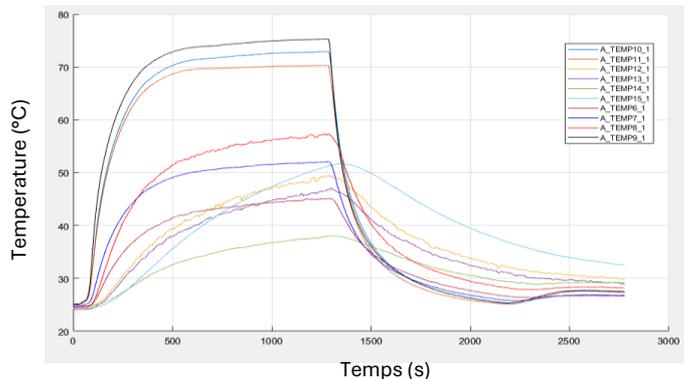


## Validations en puissance continue – validations thermiques

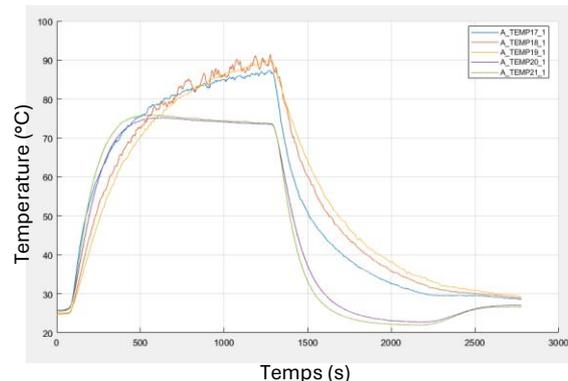
- Onduleur entièrement instrumenté avec des thermocouples
- Évaluation sur charge inductive (validations des performances AC)
- Exemple de point de fonctionnement :  $V_{dc} = 600\text{ V}$ ,  $I_{ph} = 500\text{ A}$  crête,  $F_{sw} = 30\text{ kHz}$ ,  $T^{\circ}\text{C}$  refroidissement =  $25^{\circ}\text{C}$



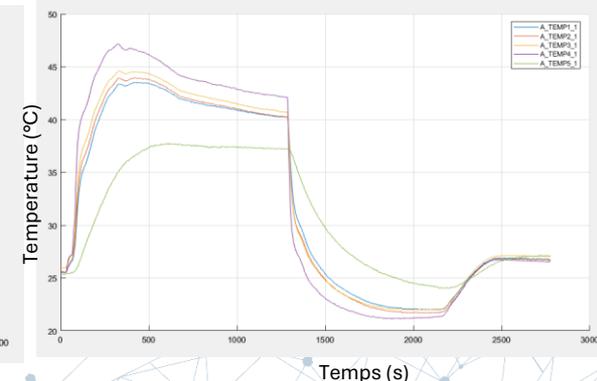
Résultats thermiques du bus DC



Résultats AC du busbars



Résultats des thermocouples sur la plaque froide



## Validations en puissance continue – validations thermiques sur charge inductive (L)

Exemple de point de fonctionnement en régime continu (plus de 5 h de fonctionnement) :

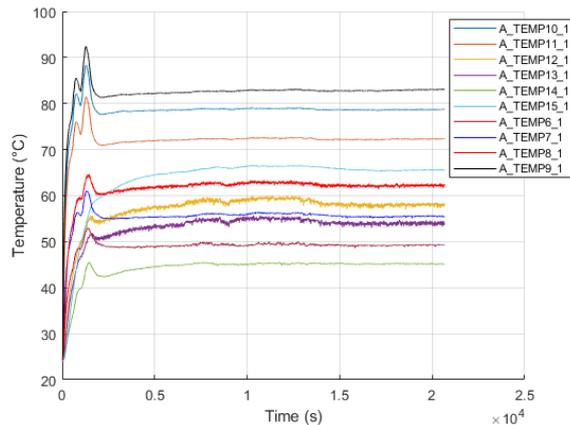
600 Vdc

500 A crête

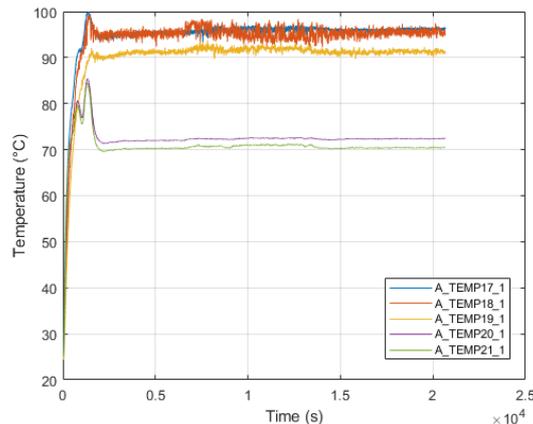
30 kHz

T° de refroidissement = 25 °C

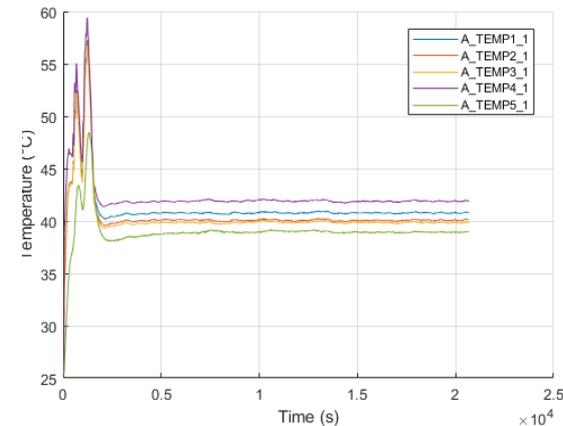
Résultats thermiques du bus DC



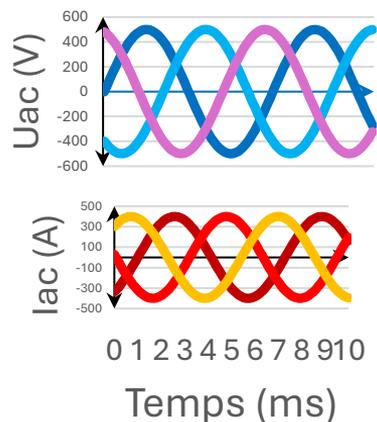
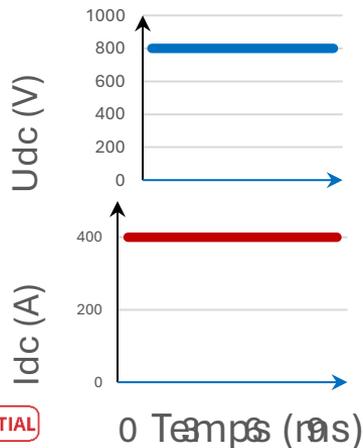
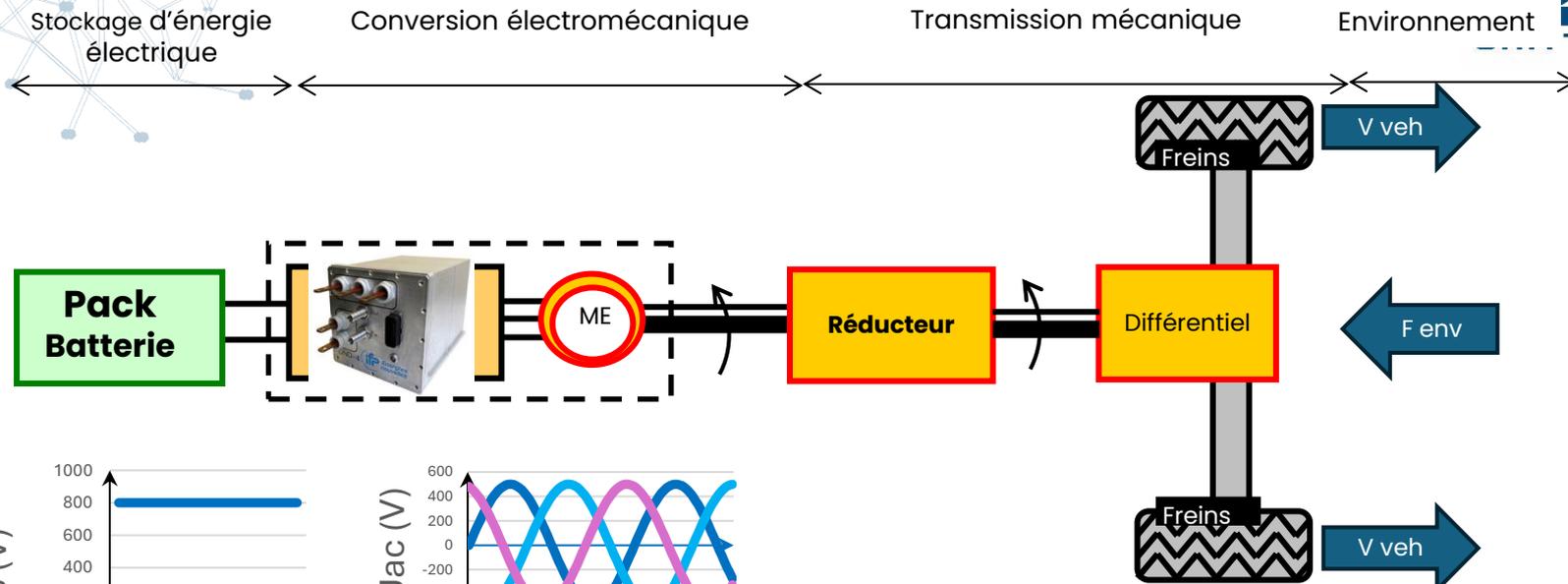
Résultats AC du busbars



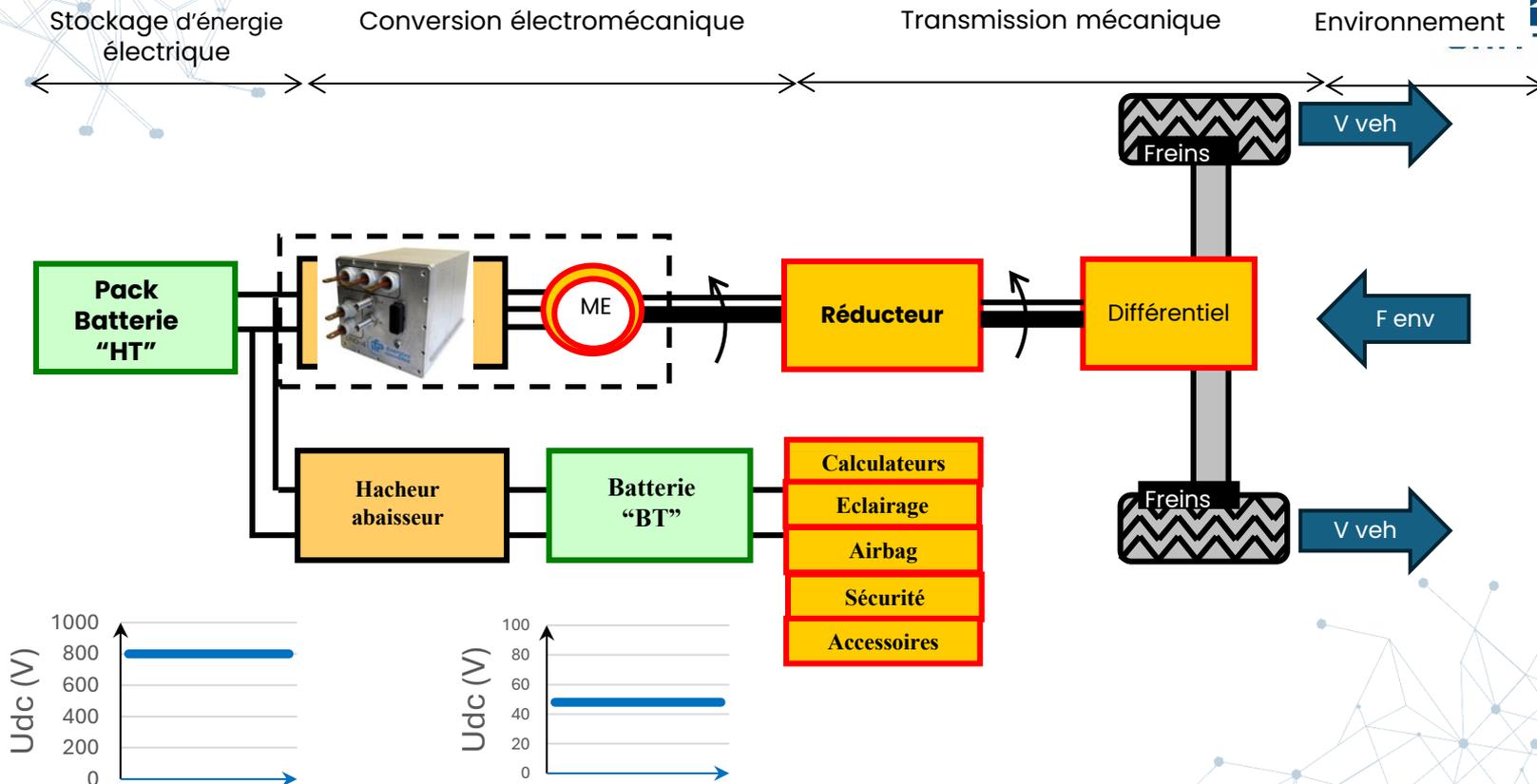
Résultats des thermocouples sur la plaque froide

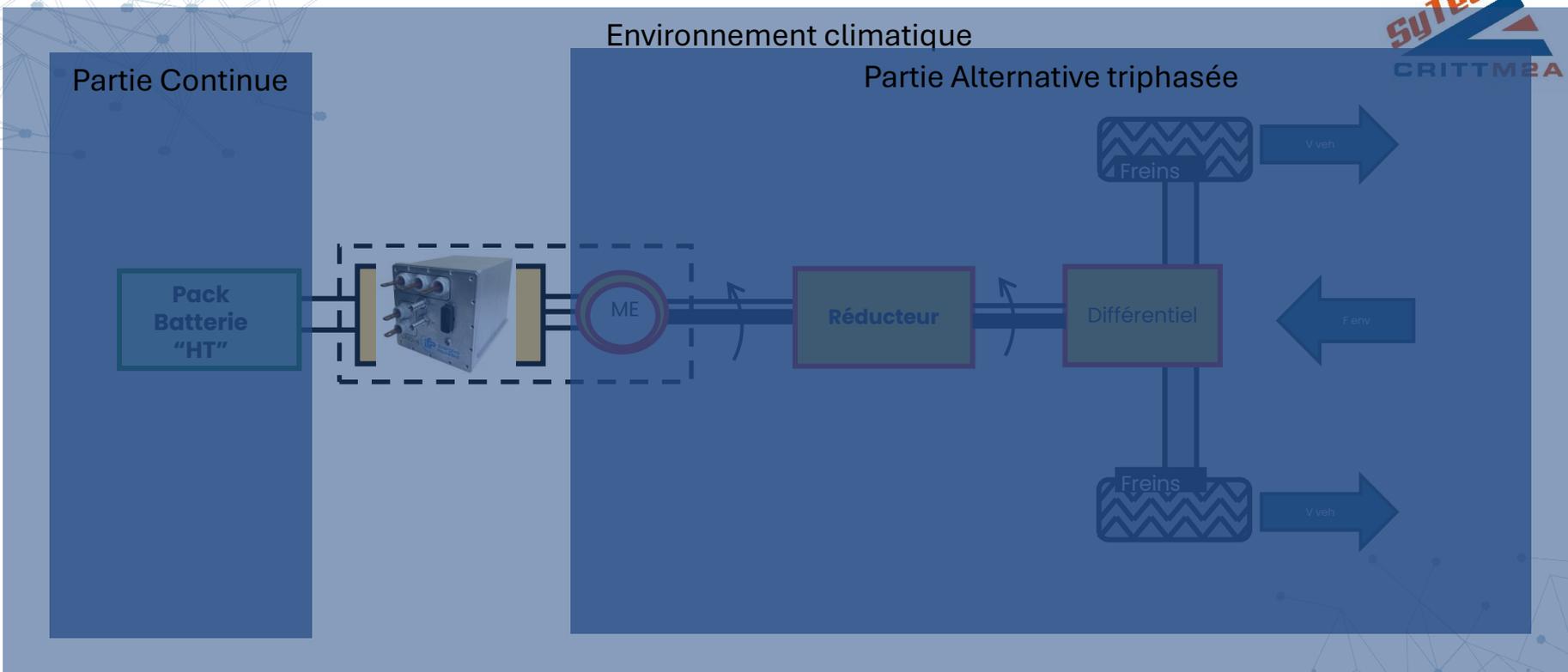


# Rappel : chaîne de traction électrique



# Rappel : chaîne de traction électrique

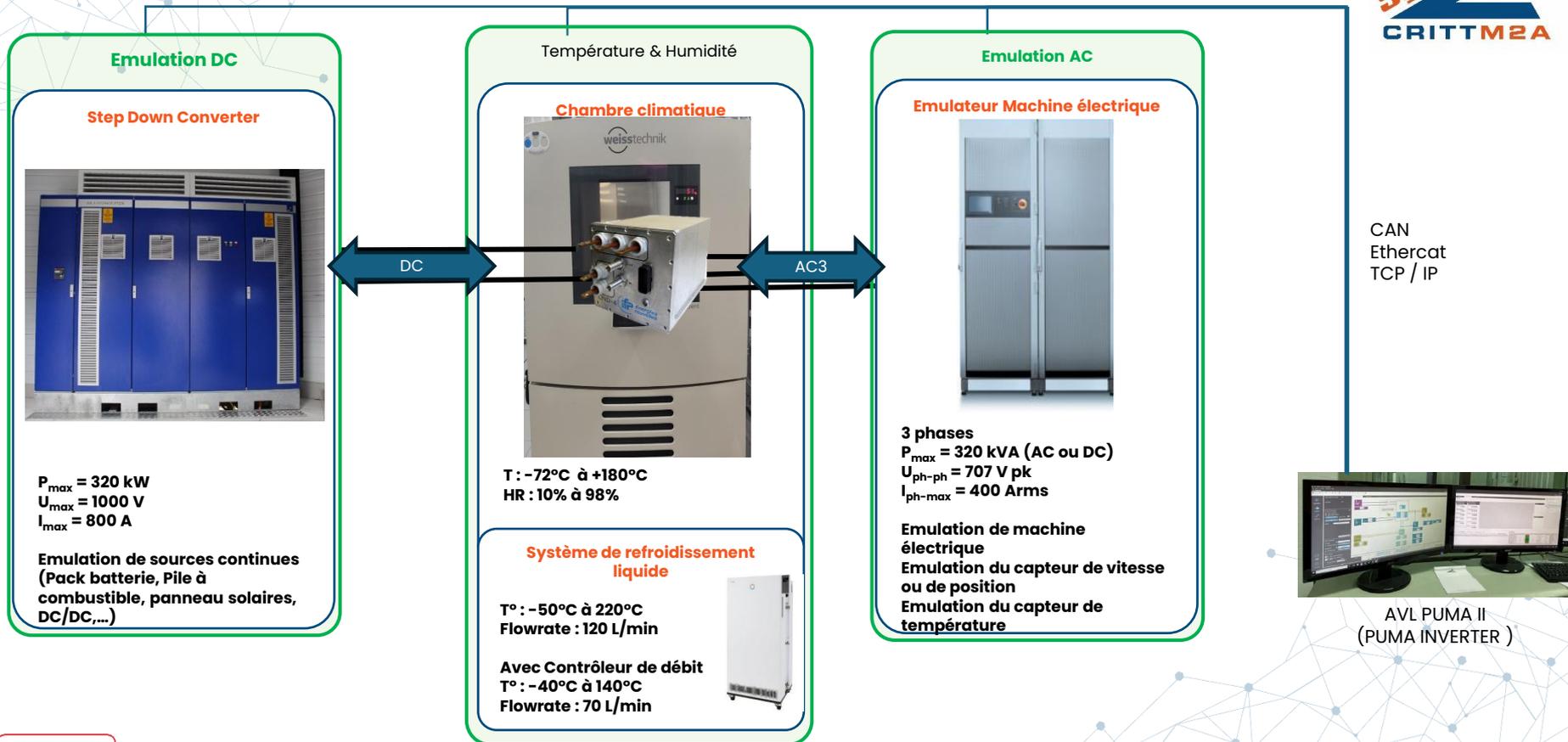




Emulation d'un bus électrique continu  
Emulation d'un bus alternatif triphasé  
Emulation d'un environnement climatique



## Banc de test onduleur



## Power Analyzer

### Xion



**Bande passante : → 800 kHz**  
**Fréquence de coupure variable**  
**Calculs temps-réel**

### PC + indicom



**IHM modulable**  
**Equation en schéma bloc**

## Baie de contacteurs

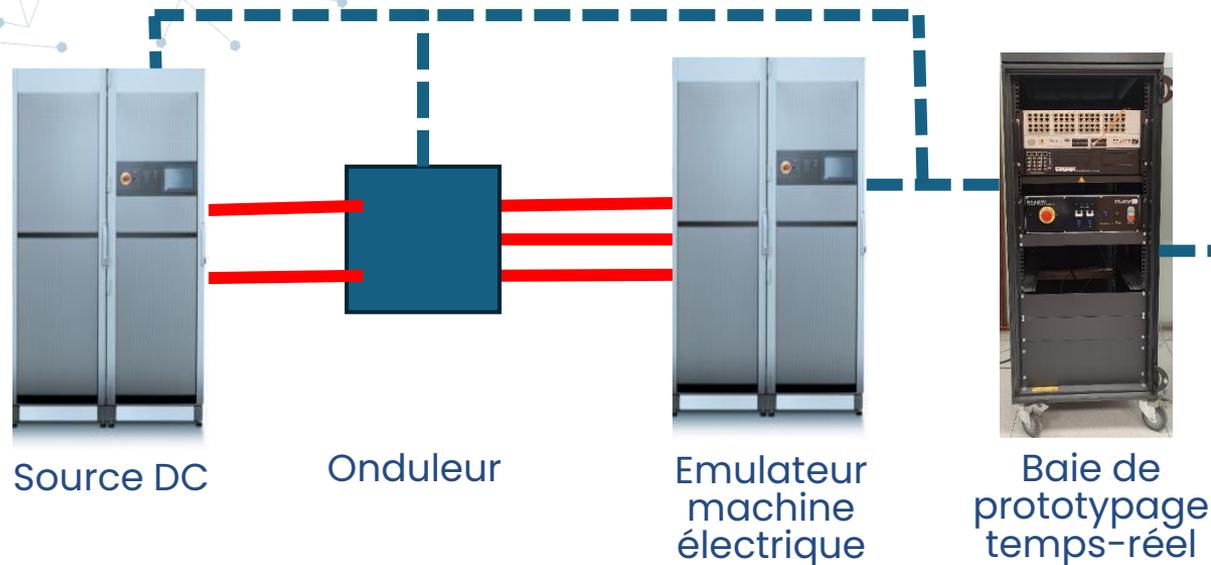
### Failure insertion Matrix



**Ouverture / Fermeture  
franche**  
**Court-circuit**  
**Déséquilibre de phase**

**Pilotable depuis l'IHM PUMA**

## » Essais Power-in-the-Loop



## » Un contrôle total

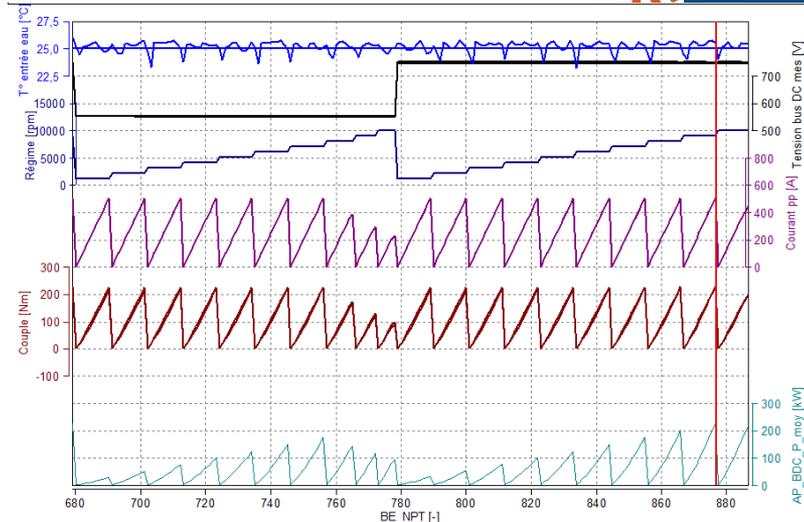
Validation des modèles développés en Laboratoire,  
Validation des lois de contrôle Electromécanique,  
Emulation de multiple véhicules, sources, charges,  
environnement

## Variables d'entrée

Température interne de refroidissement (°C)	25;65
Tension du bus continu (V)	550;750
Vitesse (tr/min)	[0:1000:10000]
Courant de phase (A <sub>pk</sub> )	[0:50:500]
Fréquence de découpage (kHz)	26 ; 30; 40; 42

## Variables de sorties

Températures internes x 20 (°C)	[24,3 : 106,5]
Rendement max (%)	98,6 (@226,7Arms; 550Vdc; 93,4 kW; 30kHz)
Puissance DC max (kW)	224



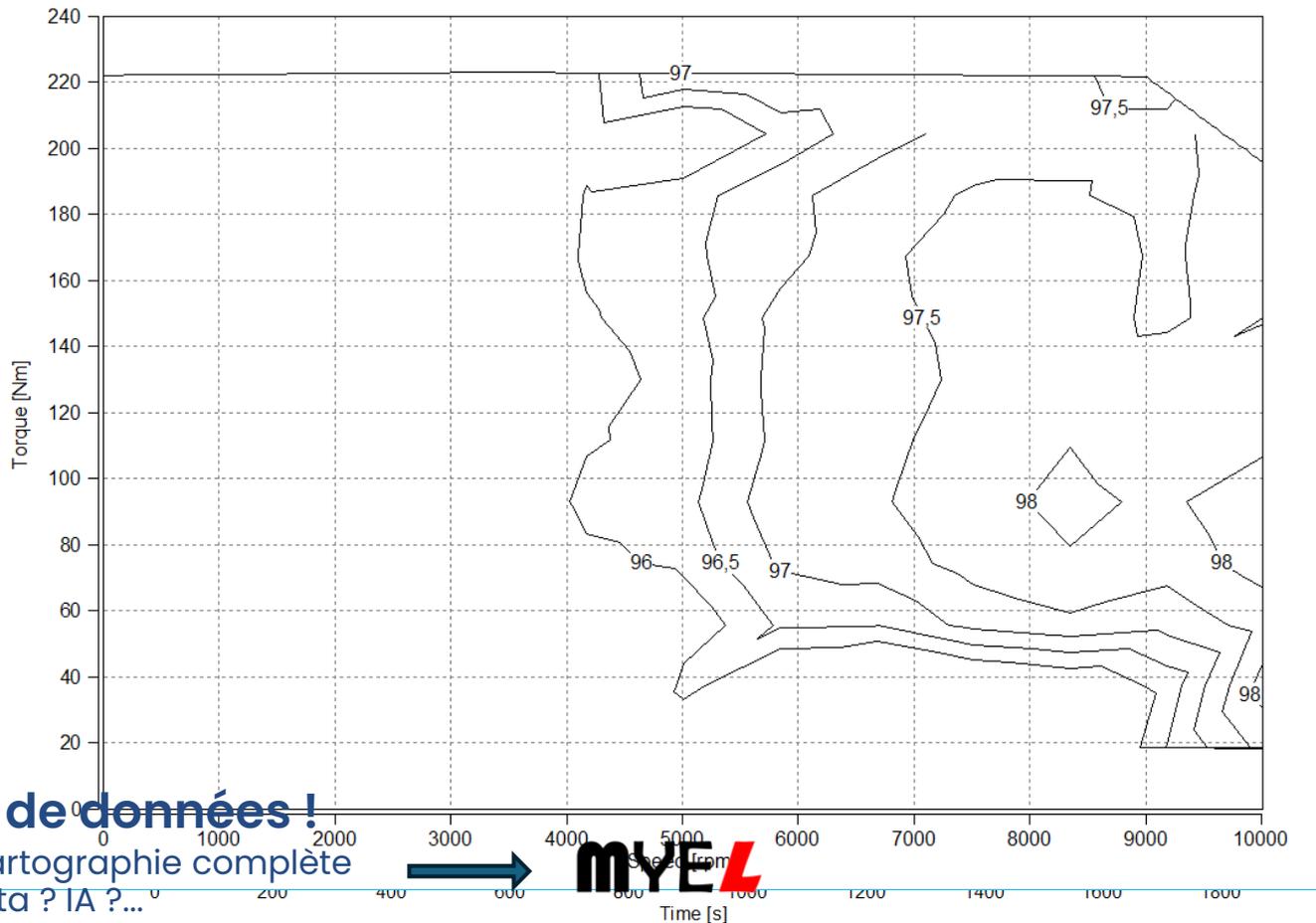
## Autres données

Nombre de points	1265
Blocs (script, sous séquences)	87
Durée d'un point électrique	1m15s
stockage	58 Go

# Résultats préliminaires

## Statut

- Mise en
- Atteinte
- Atteinte
- sans r
- To
- SV
- Par ex
- 
- 
- 
- 



## Plus de données !

Une cartographie complète  
Big data ? IA ? ...



# Conclusion

## » Synthèse des résultats

Caractérisation en laboratoire :

- Pertes / F découpage
- Température des modules de puissance / Fsw
- Température des résistances de grille / Fsw
- Analyse thermique

Caractérisation sur banc d'essai Power HIL :

- Rendement
- Puissance continue (thermique)
- Limites maximales de l'onduleur (Fsw, Irms, ...)
- Tests fonctionnels de la commande

## » Impact et enjeux

- **EFFICIENCE** : Optimisation du couple Fsw / P
- **COLLABORATION** : Mutualisation des moyens, des compétences
- **VALORISATION** : Communication au sein de la communauté du Génie Électrique
- **INTÉGRATION** : Actions sur l'ensemble du cycle en V (Modélisation → Fin de chaîne)
- **INNOVATION** : Avancée vers des systèmes plus performants et intelligents

## » Perspectives futures

- Combiner onduleur et banc Power HIL pour valider des modèles de machines électriques
- IA: répétabilité des essais et génération de jeux de données
- Projet MYEL

MYEL

LSEE  
Laboratoire Systèmes Electrotechniques  
et Environnement

LGI2A

Innovation  
Testing  
Center  
CRITTM2A



# MERCI

Pour votre attention

# Place aux Q&R



+33 (0)6 63 23 34 89



[Alexandre.BATTISTON@ifpen.fr](mailto:Alexandre.BATTISTON@ifpen.fr)



<https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/>



[Visite virtuelle](#)



[1-4, avenue de bois-préau,  
92852 RUEIL MALMAISON - FRANCE](#)



+33 (0)391 800 202



[iarlane@crittm2a.com](mailto:iarlane@crittm2a.com)



[www.crittm2a.com](http://www.crittm2a.com)



[Visite virtuelle](#)



[Rue Christophe Colomb, Parc de la Porte Nord,  
62700 BRUAY LA BUISSIÈRE - FRANCE](#)