



Conversion d'énergie électrique

Applications, Défis, Opportunités

Applications :

- Industrie (procédés, automatisation)
- Information et Communication (centre de données)
- Transports (Ferroviaire, Marine, Automobile, Aéronautique)
- Infrastructure d'énergie (Bornes recharge), Eclairage (adaptatif)
- Réseaux intelligents (Energies renouvelables, Stockage, Interconnexions)

Défis :

- Composants actifs et passifs
- Structures de conversion
- Commande des convertisseurs
- Dimensionnement optimum
- Qualification, Test
- Standardisation, Modularité
- Temps de développement
- Outil de production
- Réseaux de commercialisation

Critères de performance :

- Densité de puissance (kW/dm³ et/ou kW/kg)
- Rendement (%)
- Taux de défaillance (1/heures)
- Coût relatif (kW/€)

Opportunités :

Ruptures technologiques
Nouvelles Applications
Transition énergétique

Semiconducteurs de Puissance

Etat de l'art Si, SiC, GaN, C

Si (R&D, Production de masse)

- Améliorations continues des Technologies, Processus de fabrication, Fiabilité
- Fonctions: Diodes, Transistors (Mosfet, Igbt), GTO-IGCT, Thyristor...
- Puces: 100V-6500V ; 10A-300A ; 125-175°C ; 14x14mm (wafer 200mm)
- Modules: 100V-6500V ; 40A-3600A

SiC (R&D, Production limitée)

- Fonctions: Diodes, Transistors Jfet-Mosfet-Bipolaire (Non, Noff), Thyristors
- Puces: 600V-10KV ; 1A-50A ; 175-250°C ; 6x6mm (wafer 100-150mm)
- Modules: 1200V ; 300A

GaN (R&D, Production très limitée)

- Fonctions: Diodes, Transistors (Non, Noff)
- Puces: 40V-600V ; 1A-30A ; 125°C ; 3x3mm (wafer 150-200mm)

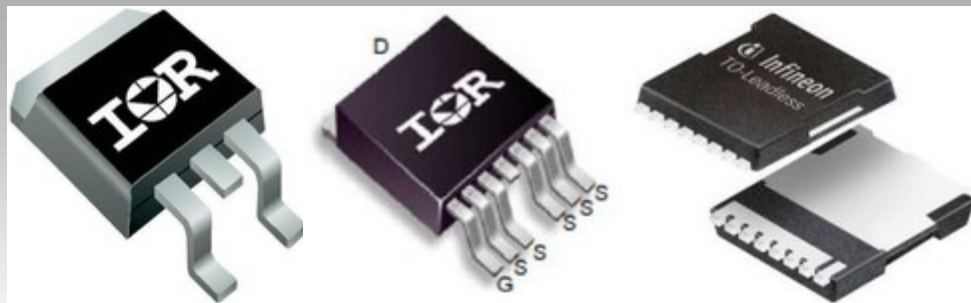
Diamant (Recherche académique et indust.)

- Fonction: Diodes
- Puce = Wafer: 3x3mm

Semi-conducteurs de Puissance

Packaging: Boîtiers discrets

- Fonctions: Interconnexions, interfaces thermique, protection puce, *isolation*
- Puces: 1 à 2
- Montage: en surface ou traversant



LIMITATIONS

- Résistances d'accès
- Inductances d'accès
- Couplage Puissance / Commande
- Tenue en tension
- Robustesse – Fiabilité

Solutions

- Nombre d'interconnexions
- Longueur des interconnexions
- Séparation Puissance / Commande



Semiconducteurs de Puissance

Packaging: Modules de puissance

- Fonctions: Interconnexions, isolation électrique, interfaces thermique, fixation mécanique, protection puces
- Pucés: 2 à quelques dizaines
- Séparation Puissance/Commande



Limitations

- Résistances d'accès
- Inductances d'accès
- Fiabilité (cyclage thermique)
- Thermique, Fixation
- Compatibilité électromagnétique

Solutions

- Fils Cuivre, Rubans, Billes / Fils Alu
- Interconnexions co-planaire ou double-face
- Frittage, Collage / Brasures
- Refroidissement direct, double face
- Routage, Intégration passifs

Structures de conversion

DC/AC, DC/DC...

Structures 2 niveaux :

- Onduleur/Redresseur (tension ou courant)
- Hacheurs, DC/DC isolés (avec ou sans réversibilité)

Structures Multi-Niveaux :

- Onduleurs, Hacheurs, DC/DC isolés
- Série (NPC, Capacités Flottantes...)

Parallèle (Inductances, Transformateur de couplage)

- Structures à Résonance :
- Onduleurs, Hacheurs, DC/DC isolés
- Evolution DC/DC : simple vers double résonance

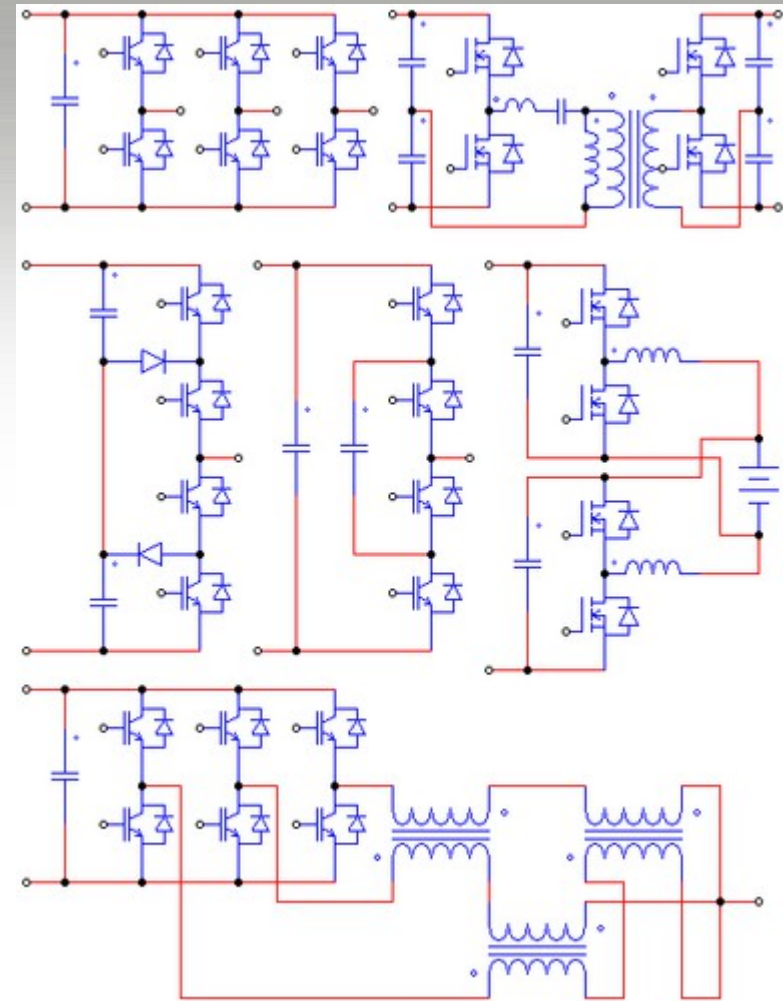
Association de Structures :

- Série, Parallèle, Mixte, Exotique
- Commutation douce (ZVS, ZCS) :
- Applicable aux différentes topologies (+/- avantages)

Tolérance de panne

- Fonctions spécifiques / Structures

Impératif : Tri, Classification (propriétés, applications)



Commande des convertisseurs

Drivers, Modulateurs, Capteurs, Régulations

Drivers :

- Contrôle commutation (gestion des pertes et/ou surtension)
- Gestion locale en boucle fermée des temps morts (linéarisation)
- Protections, Monitoring (prédiction pour maintenance préventive)

Modulateurs :

- Diversité (Tables, PWM, Hystérésis, Glissement...)
- Utilisation degrés de liberté pour réduction des pertes et/ou CEM
- Reconfiguration automatique / tolérance de panne

Capteurs (courants, tension...) :

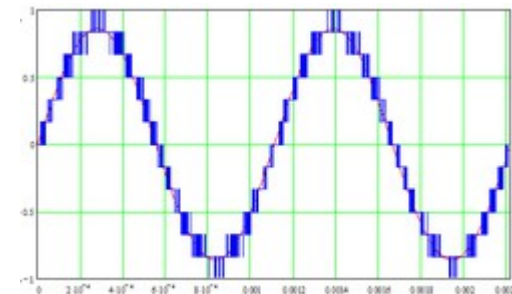
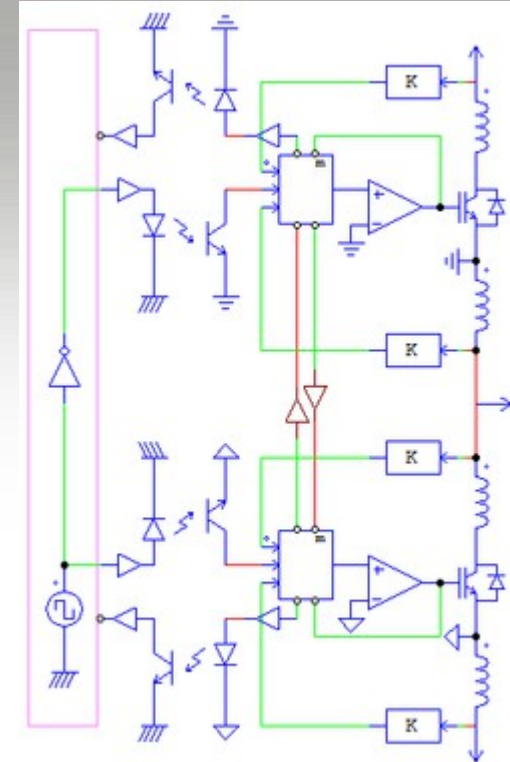
- Mesures DC, AC (BF et/ou HF), différentiel,
- Shunt, TI, Hall, DCCT, Magnétorésistif, Néel, Hybrides, SC

Régulations (diversité) / Implémentation :

- Analogique et/ou Numérique rapide (FPGA) pour DC/DC 2 ou x-niv
- Numérique (μ C, DSP) pour onduleurs moteur ou réseau
- μ C double-cœur ou FPGA compatibles avec systèmes critiques (SF)

- Intégration des fonctions (driver)

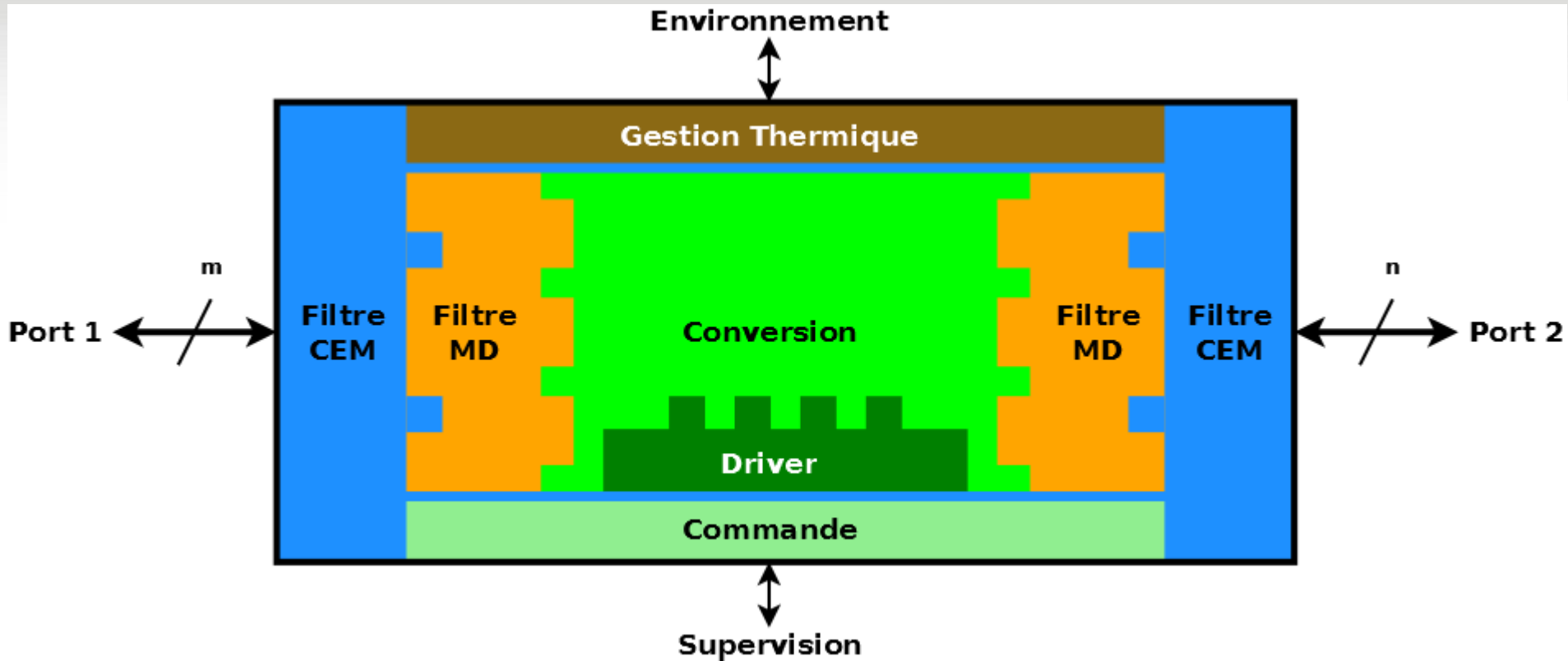
- Tri / propriétés, applications (modulateurs, capteurs, régulations)



Convertisseurs statiques d'énergie électrique

Contrôle du flux d'énergie électrique échangé entre plusieurs ports dans un environnement donné

- Ports : Sources (permanente, transitoire), Charges (moteurs, procédés) ; AC, DC, Pulsé
- Topologie de conversion, Commande, Filtres, Thermique, Compatibilité ElectroMagnétique





Dimensionnement

Modélisation, Simulations, Calculs, Optimisation

Modélisation (Energétique, Multi-Physique, Electrique) :

- **Respecter Causalités, Hypothèses, Domaine de validité**
- **Sources, Charges, Composants (actifs, passifs), Commande, Système**

Simulations et Calculs (numériques) :

- **Circuit Electrique, Electromagnétique (Magnétique, Diélectrique, CEM)**
- **Thermique, Thermo-Mécanique**
- **Co-Simulation (complexe et souvent pas indispensable)**

Optimisation :

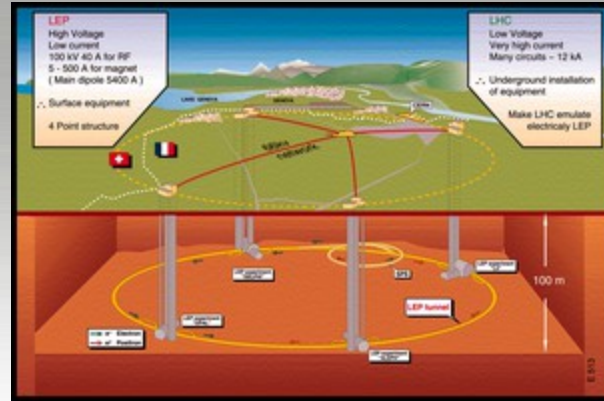
- **La façon de poser le problème est primordiale**
- **Réduire le problème sur la base des causalités**
- **Méthode d'optimisation secondaire (simplicité, robustesse)**
- **Bons résultats pour les composants (actifs, passifs), filtres**
- **L'optimisation de convertisseurs statiques est balbutiante**

Conclusion :

- **Multi-disciplinaire (Matériaux, Composants, Circuit, Commande, Calcul)**
- **Nombreux défis pour répondre aux nouvelles applications**

Développement et Production

LHC : 444 Alimentations 4 quadrants $\pm 10V/\pm 600A$



R&D, Transfert et Production

Alimentation de Sonar



- Nouveau concept d'alimentation de Sonar développé pour la DGA réduisant par 3 la taille du système
- Transfert de technologie à Thales Underwater System
- Licence d'exploitation
- Industrialisation d'un module de puissance PFC triphasé de 46kW

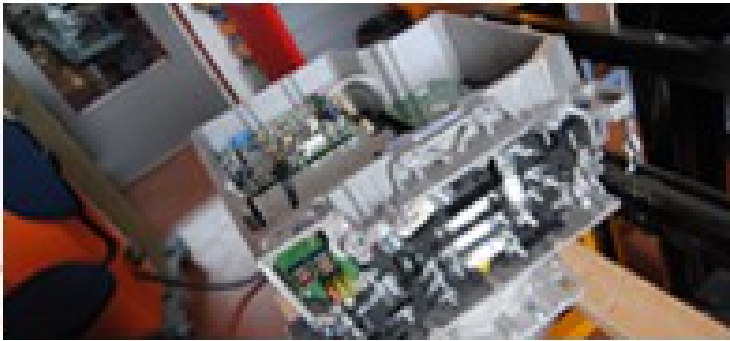
Alimentation pour sonar

THALES



Développement et Production

Véhicule électrique



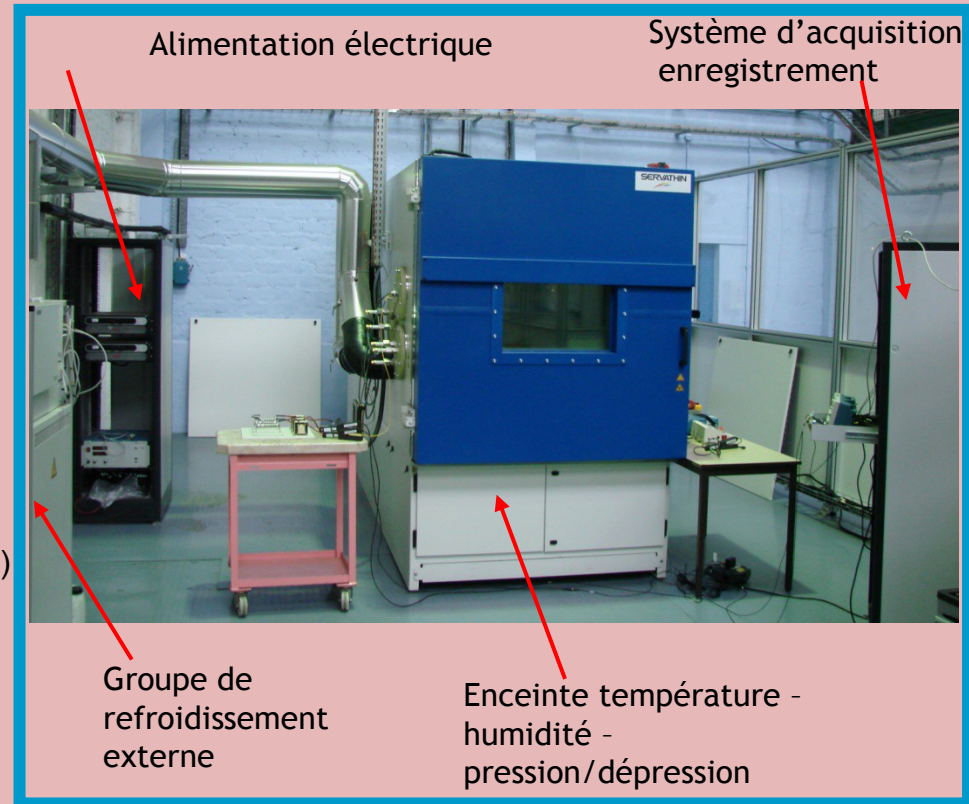
batS/cap

- Variateur de vitesse pour chaîne de traction de véhicule électrique (R&D depuis 1992)
- Prestations: études avancées, étude, prototype, essais labo, essais roulants, plusieurs réalisations
- Production en série du variateur de vitesse de la BLUECAR (AUTOLIB')



Outil d'essai multi-contraintes unique basé à

- **Combinaison des contraintes électriques - thermiques - humidité - dépression :**
 - **Température**
 - de -70°C à $+200^{\circ}\text{C}$ ($+10/-10^{\circ}\text{C}/\text{min}$)
 - **Humidité relative**
 - de 20 à 98 %
 - **Pression du milieu entourant le système en test**
 - de PA à 90 mbar (altitude 0 à 55000 pieds)
 - **Electriques**
 - Tension : 270 V à 6500 V DC
 - Courant : 0 à qqes 1000 A
- **Groupe de froid pour refroidissement des systèmes en tests : de -50 à $+200^{\circ}\text{C}$**
- **Zone de travail : 1m^3**



Outil d'essai multi-contraintes unique basé à

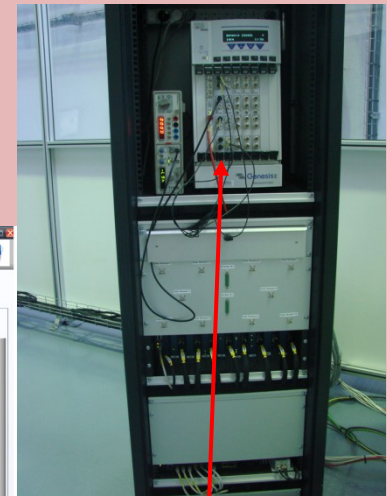
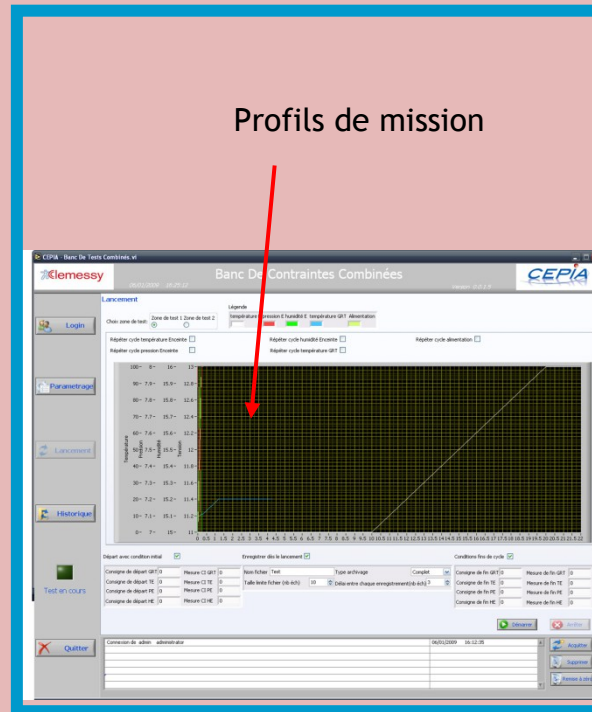
- **Système de supervision :**

- Unique pour tous les équipements,
- Sur la base du logiciel LabView,
 - Cartes National Instruments,
 - Pilotage synchrone ou asynchrone pour chaque équipement.



Ecrans de contrôle

Profils de mission



Système d'acquisition enregistrement

- **Système d'acquisition et de gestion des données :**

- Système d'acquisition et enregistrement haute vitesse HBM (NICOLET)
 - 8 voies 25 MS/s (typiquement phénomènes électriques)
 - 16 voies 200 kS/s (typiquement phénomènes climatiques)
- Stockage dans BdD MySQL: 10 To (20 000 mesures /s pendant 8 ans)

- **Plus de 5000 heures d'essais cumulées sur le banc d'essai sur des convertisseurs aéronautiques et ferroviaires ont permis de :**
 - Révéler des modes de défaillance non détectés par les processus de validation classique
 - Envisager la définition d'essais de validation plus pertinents par rapport aux profils de mission applicatifs (combinaison des contraintes thermiques, électriques et dépression)