

# DÉVELOPPEMENT DE NOUVEAUX MATÉRIAUX HAUTE TEMPÉRATURE POUR PROPULSION NUCLÉAIRE ÉLECTRIQUE



M. Singlard<sup>1,2,\*</sup>; S. Rossignol<sup>1</sup>; M. Vardelle<sup>1</sup>; S. Oriol<sup>2</sup> // <sup>1</sup>SPCTS; <sup>2</sup>CNES-DLA // \*Contact : marc.singlard@unilim.fr ; 05 87 50 23 92

## PROBLÉMATIQUE : AUGMENTER LA PUISSANCE ET LA PERFORMANCE DES MISSIONS SPATIALES



- Mission cargo Terre - Mars
- Remorqueur lunaire
- Exploration système solaire lointain
- Déviateur d'objets géocroiseurs

## CAHIER DES CHARGES DE L'AUBE

### Contraintes géométriques

- Hauteur d'aube : 40 mm
- Diamètre turbine : 450 mm
- Ancrage : pied de sapin
- Pas de refroidissement interne

### Contraintes système

- Durée d'exploitation : 10 ans
- Atmosphère : He-Xe (O<sub>2</sub> < 5 ppm)
- Température : 1600 K
- Charge >> 50 MPa (100 MPa)
- Vitesse rotation : 11500 tr/min
- Vitesse périphérique : 300 m/s
- Nb. démarrages : 30-40

### Propriétés thermomécaniques d'intérêt

#### Grandeur dimensionnante : Fluage

2% en 10 ans soit  $6 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$

- Résistance mécanique
- Ténacité
- Densité
- Dilatation thermique (Dépend du matériau d'interface)
- Conductivité thermique
- Stabilité aux gaz de turbine

## SOLUTION : PROPULSION NUCLÉAIRE ÉLECTRIQUE

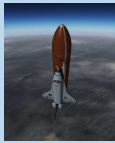
350 mL d'uranium



= 50 x

La densité énergétique du nucléaire est sans équivalent connu

Réservoir externe de navette



## HAUTE PUISSANCE ET HAUTE TEMPÉRATURE

### Contraintes techniques : 10 ans - 1 MWe

Nécessité d'augmenter la température de turbine à 1600 K, soit 500 K au-dessus de la température limite des superalliages modernes (gain de masse des radiateurs / de la source froide : 75%)

**Trouver de nouveaux matériaux pour réaliser les aubes de turbine**

## SÉLECTION DES MATÉRIAUX PAR LA TENUE AU FLUAGE



476 références analysées  
1948-2017  
Articles, ouvrages, présentations, brevet, etc.



122 matériaux recensés  
Carbure, borure, nitrure, oxydes, métaux réfractaires, composites, etc.



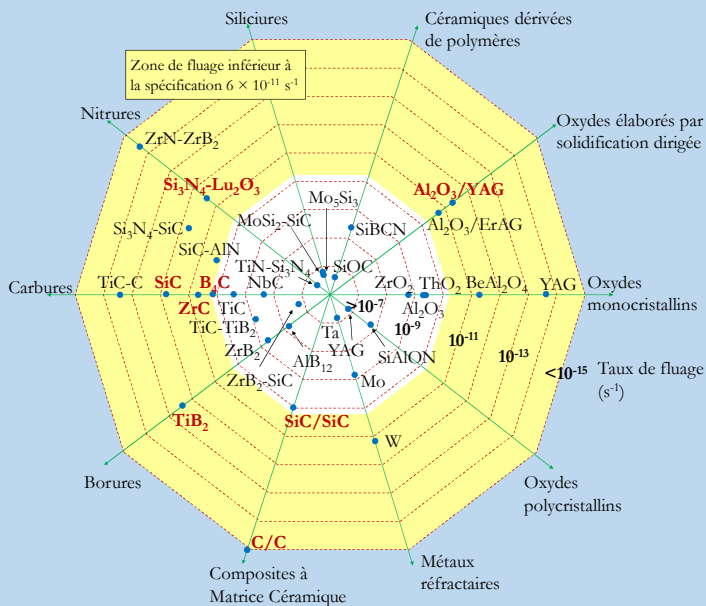
1255 points de donnée de fluage

Les essais de la littérature étant effectués à diverses températures, des extrapolation du fluage à 1600K sont nécessaires, en suivant l'équation :

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

$\dot{\epsilon}$  Taux de fluage (s<sup>-1</sup>)  
 $\sigma$  Contrainte mécanique (MPa)  
 $T$  Température (K)  
 $n$  Exposant de charge ( $\geq 1$ )  
 $Q$  Energie d'activation (kJ/mol)

Le traitement des données de la littérature permet d'établir le taux de fluage à 1600 K pour de nombreux matériaux en fonction de leurs classes



**Matériaux retenus : Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, TiB<sub>2</sub>, SiC, B<sub>4</sub>C, ZrC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/YAG, SiC/SiC, C/C**

## WORKSHOP Matériaux céramiques et composites à fibres hautes températures

le 23/10/17 à Toulouse

Un workshop a été créé sur les matériaux HT pour applications aérospatiales et de l'énergie. Il est gratuit et ouvert à tous les acteurs publics ou industriels. Contactez l'auteur pour plus d'informations



## CONCLUSIONS

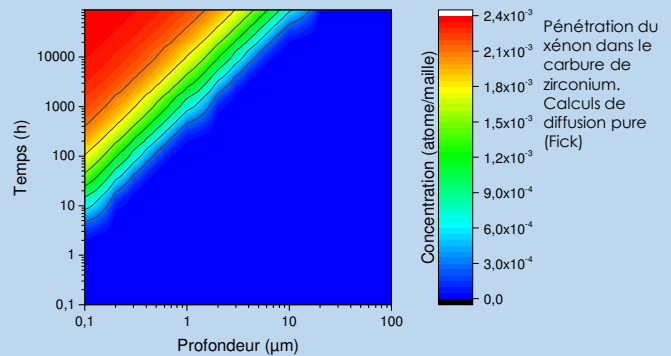
- Plusieurs céramiques, majoritairement pures, répondent à la spécification de fluage
- Conformément aux prévisions, les métaux sont hors gamme
- Les composites à fibres (CMC) SiC/SiC sont moyens en fluage mais excellents en résistance à l'endommagement
  - Les problèmes de diffusion des gaz et d'oxydation sont secondaires

Le projet consiste à déterminer quels sont les matériaux ou les familles de matériaux susceptibles de répondre au besoin.

Trois étapes sont identifiées :

1. Recherche bibliographique poussée sur les matériaux à très bas taux de fluage
2. Identification des acteurs publics et industriels nationaux
3. Réalisation d'éprouvettes de tests et classification des matériaux retenus

## STABILITÉ AUX GAZ DE TURBINE



Les calculs préliminaires tendent à montrer que la stabilité au xénon est assurée (cf. graphe). La stabilité à l'hélium est plus critique, avec une profondeur de pénétration estimée de l'ordre de 100 µm en 10 ans (calculs non montrés).

Les calculs d'oxydation permettent de négliger cette problématique compte-tenu de la faible concentration en O<sub>2</sub>. Seul le nitrure de silicium pourrait présenter une instabilité.

## PERSPECTIVES

- Des tests de fluage sont programmés. Ces tests demandent des montages spécifiques fonctionnant à très haute température et mesurant des déformations extrêmement faibles
- Le budget doit être optimisé afin de tirer le maximum d'informations (densification, fluage sur plusieurs matériaux)
- La problématique de la mise en forme sera abordée