

## Introduction

Lors des opérations effectuées pour fabriquer le combustible MOX, des déchets technologiques mixtes sont produits avec un volume total d'environ 46 000m<sup>3</sup> (à fin 2015). Leur caractéristique est de contenir un mélange de métaux, de verre et d'éléments organiques. Ces déchets radioactifs de Moyenne Activité à Vie Longue (MA-VL) représentent 3% du volume total des déchets nucléaires Français. Ils sont destinés à être stockés dans le futur centre de stockage en formation géologique profonde Cigéo.

Ce type de déchets présente toutefois une problématique : sous l'effet de l'irradiation par le phénomène de radiolyse, la matière organique produit du gaz, en particulier qui peut entraîner des risques d'explosion, ainsi que des composés corrosifs néfastes pour la durabilité des conteneurs métalliques renfermant ces déchets, ce qui empêche le stockage de ces colis dans Cigéo. Afin de permettre le stockage de ces derniers, le Procédé d'Incinération fusion et Vitrification In Can (PIVIC) a été retenu. 'Can' est le nom donné au creuset utilisé pour contenir les matériaux pendant la fusion. Ces matériaux seront en contact direct avec les céramiques C-Sic qui constituent la première couche du 'Can'.

**Est-ce que le matériau composite C-Sic utilisé dans le 'Can' du procédé PIVIC, participe au renforcement de la sûreté de stockage ?**

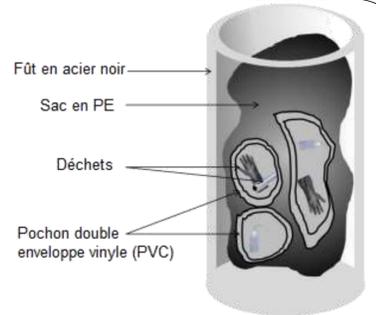


Figure 1 : Fût primaire PIVIC à traiter (Balme, 2018)

## I- Etat de l'art

### Phénomène de radiolyse

Les polymères sous l'effet de l'irradiation par le phénomène de radiolyse présentent un danger d'explosion et de corrosion ( Figure II).

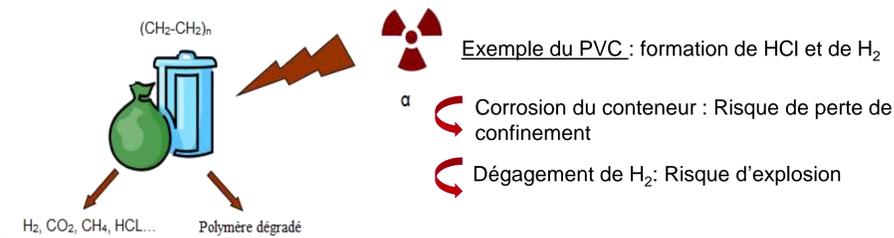


Figure II : Radiolyse des polymères (IRSN,2017)

### Description du projet PIVIC

Les colis de déchets sont introduits par un sas d'alimentation des colis dans le four de combustion. Une torche plasma chauffe les déchets, la matière organique brûle et se transforme en cendres. La partie basse du procédé est constituée du 'Can' chauffé par induction, dans lequel les déchets issus de la partie haute sont introduits (ajout fritte de verre). Le métal fond par induction et provoque la fusion de la fritte de verre et l'incorporation des cendres dans cette fritte de verre fondue.

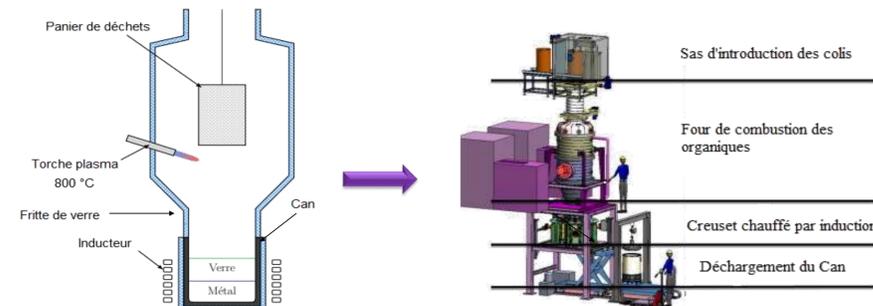


Figure III : Dessin Auto-CAD 3D et schéma de principe du procédé PIVIC (Bourrou, n.d.,2019)

### Description du 'Can'

Le 'Can' est composé de trois couches, une enveloppe métallique, un isolant thermique et une céramique carbone-carbure de silicium (C-Sic) (Figure IV).

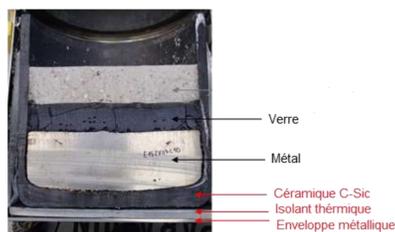


Figure IV : Colis bi-phasique ((Bourrou, 2019)

## II- Caractérisation et propriétés des Céramiques C-Sic

### Céramique C-Sic

La céramique C-Sic, fait partie de la classe des Céramiques à Matrice Céramique (CMC), sa composition est dans le tableau ci-dessous:

Tableau I : Composition chimique du creuset C-SIC (Chevreux,2016)

% en masse	C	SIC (Carbure de silicium)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Creuset C-Sic	35-41	9-16	31-37	12-17	2-5	<1

### Caractéristiques physiques des céramiques C-Sic

Les céramiques C-Sic ont des propriétés thermiques et mécaniques avantageuses comparées aux céramiques SiO<sub>2</sub> et aux alliages métalliques (Tableau II). Ce qui fait de ces céramiques (C-Sic), le candidat le plus adapté au procédé PIVIC et aux conditions de stockage.

Tableau II : Comparaison céramiques C-Sic avec les métaux (Les Matériaux Carbonés,2016/P,Lefort,2018)

	C-Sic	SiO <sub>2</sub>	Métaux/alliages
Température fusion [°C]	2300 - 2500	1100	600 – 1600
Limite d'élasticité estimée [MPa]	10 000	75	90 - 470
Dureté [GPa]	28 - 33	5	0,2 – 4
Rigidité [module de Young /GPa]	Très forte 450	Très faible 70	Faible (100-200)
Coefficient de dilatation thermique [10 <sup>-6</sup> .K <sup>-1</sup> ]	4,3 - 5,5	0,4	5
Résistance à l'altération aqueuse	Très bonne <10 <sup>-5</sup> mm/an (à 40 °C et à pH=5,6)	Bonne 10 <sup>-2</sup> (à 40 °C et à pH=5,6)	Médiocre à mauvaise 0,3 mm/an (à 40°C et à pH=5,6)
Conductivité thermique [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Faible 10	Faible 15	Forte 200

#### • Avantages

- Très bonne résistance à la température
- Très haute dureté
- Faible coefficient de dilatation
- Très haute résistance à la corrosion
- Faible conductivité thermique

#### • Inconvénients

- Procédé de fabrication long et complexe
- Très coûteux

Des études en cours ont montré que ces céramiques C-Sic présentent aussi une forte stabilité aux irradiations avec faibles modifications structurales (Figure V).

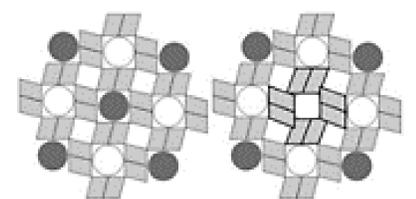


Figure V : Modifications structurales des C-Sic (R.Grote -T.Hong ,nd)

## Conclusion

Le projet PIVIC permet le traitement des déchets MA-VL avec un minimum d'interventions. Le 'Can' utilisé dans PIVIC permet d'éviter la coulée de matériaux à haute température, qui est une étape délicate, particulièrement lors de l'implication d'éléments radioactifs et constitue la première barrière entre l'environnement et les déchets.

La diversité des céramiques et leurs propriétés font d'elles des matériaux d'avenir. Les céramiques C-Sic résistent aux conditions opératoires du procédé PIVIC et permettent de renforcer la résistance des colis à la corrosion, notamment en s'alliant avec les propriétés de l'acier.

Les céramiques candidates dans des études poussées pour faire le gainage des barres de combustible, car le zirconium actuellement utilisé présente une grosse problématique de corrosion.

Les céramiques Sic sont des matériaux de structure potentiels pour les réacteurs nucléaires haute température du futur.

## Bibliographie

- A.Marchand, 1986, Comité International pour la Caractérisation et la Terminologie du Carbone
- Investir l'Avenir, ANDRA, 2017, PIVIC : Procédé d'Incinération fusion et Vitrification In Can
- Orano, 2016-2018, Rapport d'étape présentant l'état d'avancement à fin 2018 des travaux de développement du procédé d'incinération / vitrification (PIVIC) visant à conditionner les déchets MA-VL organiques riches en émetteurs alpha
- P .CHEVREUX,2016, Comportement de l'uranium et de ses stimulants dans les verres d'aluminosilicates en contact avec des métaux fondus
- R .BOURROU, 2019, Développement d'un modèle numérique magnéto-thermo-hydrodynamique pour un procédé de fusion par induction d'un mélange métal-verre