

Méthodes de gestion du combustible HTR

Fabrice Guittonneau

Directeurs de thèse :
Abdesselam Abdelouas
Bernd Grambow

Mercredi 28 octobre 2009



Qu'est-ce qu'un HTR ?

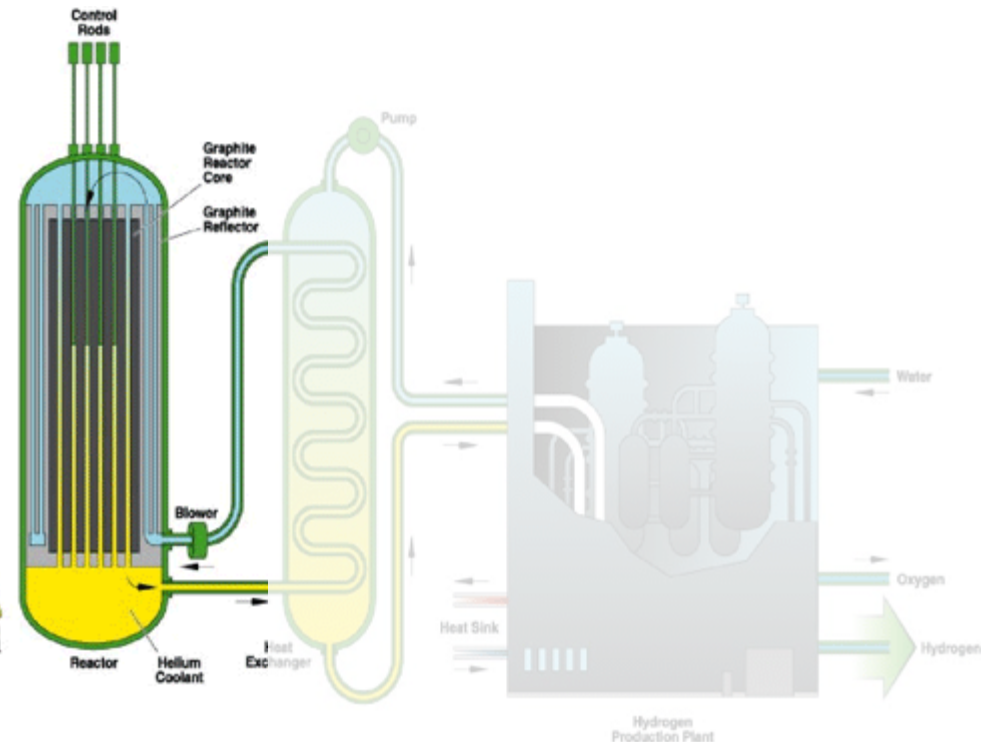
HTR = Réacteur à Haute Température

Variante : VHTR (Réacteur à très haute température)

Sélectionné pour la IV^{ème} génération de réacteurs

Points + : efficacité thermique, utilisation de l'U, sûreté intrinsèque, coût faible

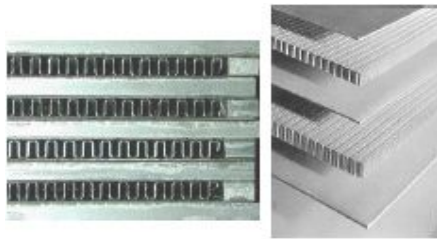
- Spectre de neutrons thermiques (modérateur graphite → inertie thermique)
- Refroidi au gaz (caloporteur hélium → inertie chimique)
- **Température 300-850°C**
- Pression élevée (quelques dizaines bars)
- Faible puissance volumique ($\sim 6 \text{ MW/m}^3$)
- Cycle direct / indirect (→ IHX)



Qu'est-ce qu'un HTR ?

Le composant clé :
l'échangeur de chaleur (IHX)

- Compact, résistant à la pression, rendement <90%
- Grande surface : 1000-4000 m²/m³
- Géométries :



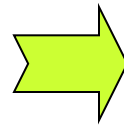
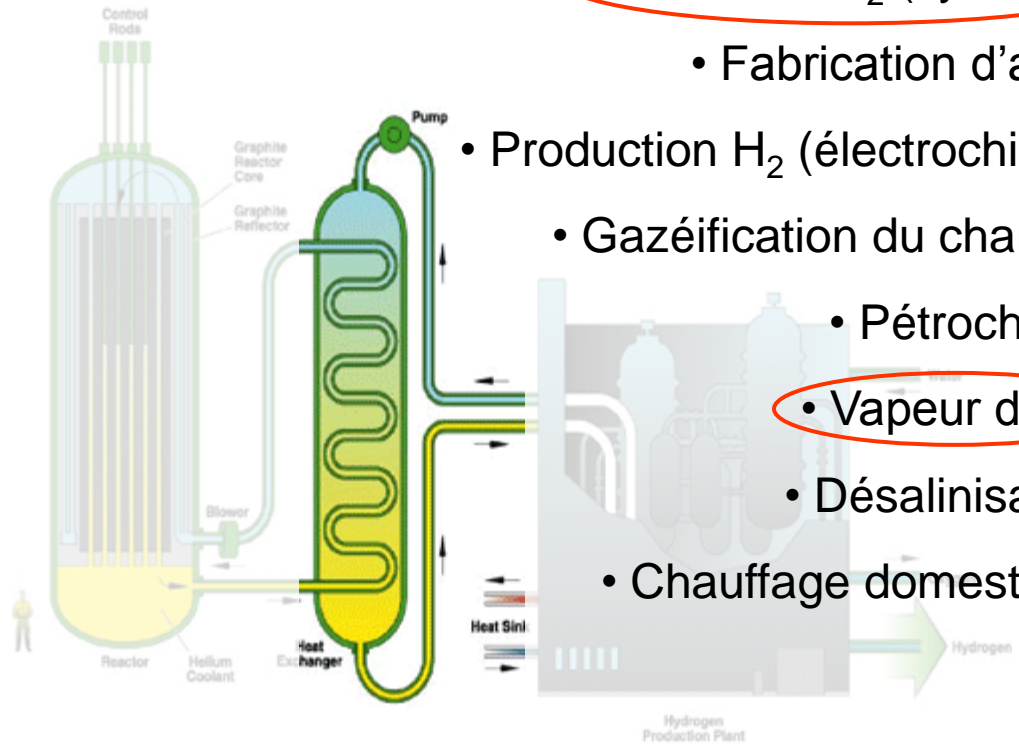
PFHE :



PCHE :

Nombreuses applications :

- Production H₂ (cycle S/I)
- Fabrication d'acier
- Production H₂ (électrochimie)
- Gazéification du charbon
- Pétrochimie
- Vapeur d'eau
- Désalinisation
- Chauffage domestique



Potentiel économique



Nombreux projets à l'étranger :

- Afrique du Sud (PBMR)
 - Chine (HTR-PM)
 - Japon (GTTR 300)
- Corée du Sud (NHDD)
 - Etats-Unis (NGNP)

Bon avancement des signatures d'accord pour les HTR

Encore des défis technologiques :

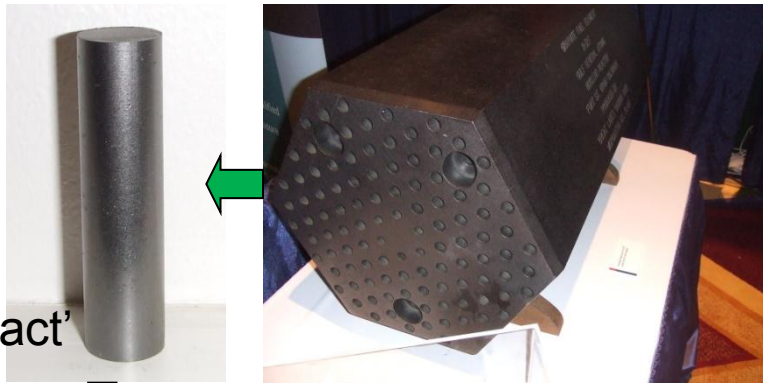
- Tuyauteries (joints...) : hautes P et T
 - Développement de l'IHX
- Mise au point de la production de H₂
- Combustible (tenue à burn-up élevé)

→ Deux géométries d'assemblage...

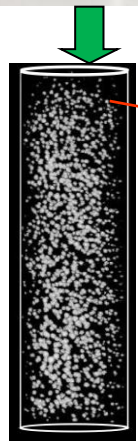
Deux types d'assemblage de combustible

Concept "bloc hexagonal"

créé pour DRAGON (UK) et Peach Bottom (US), repris par US (FSV, NGNP), JP (HTTR, GTTR)



'compact'



Particule TRISO :

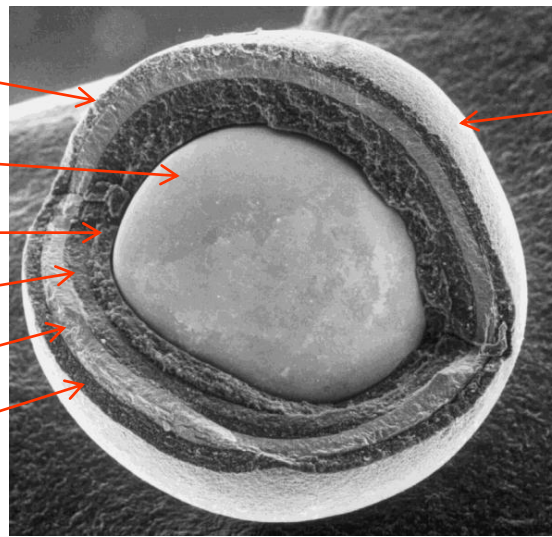
Cœur d'UO₂

Tampon PyC

PyC interne

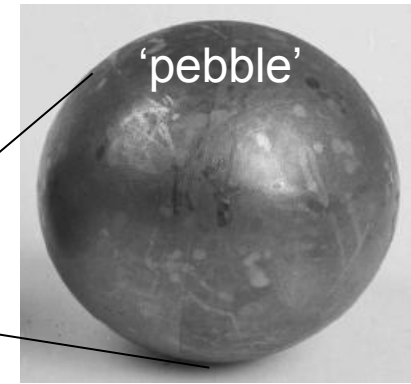
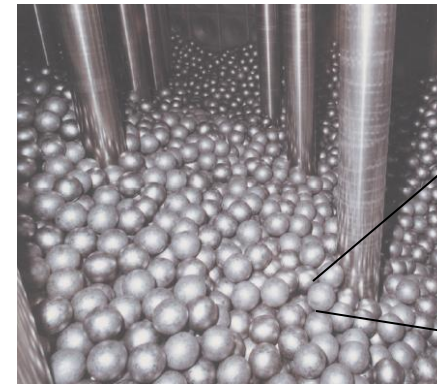
SiC

PyC externe

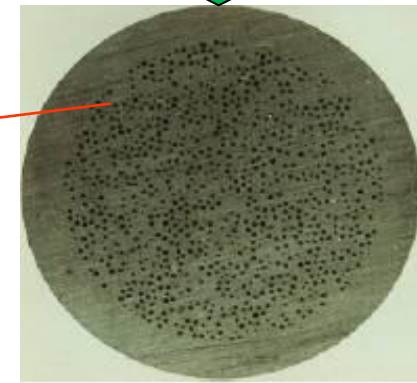


Concept "lit de boulets" ("pebble bed")

créé en Allemagne (AVR, THTR), repris par CN (HTR-10, HTR-PM), ZA (PBMR), KR (NHDD)

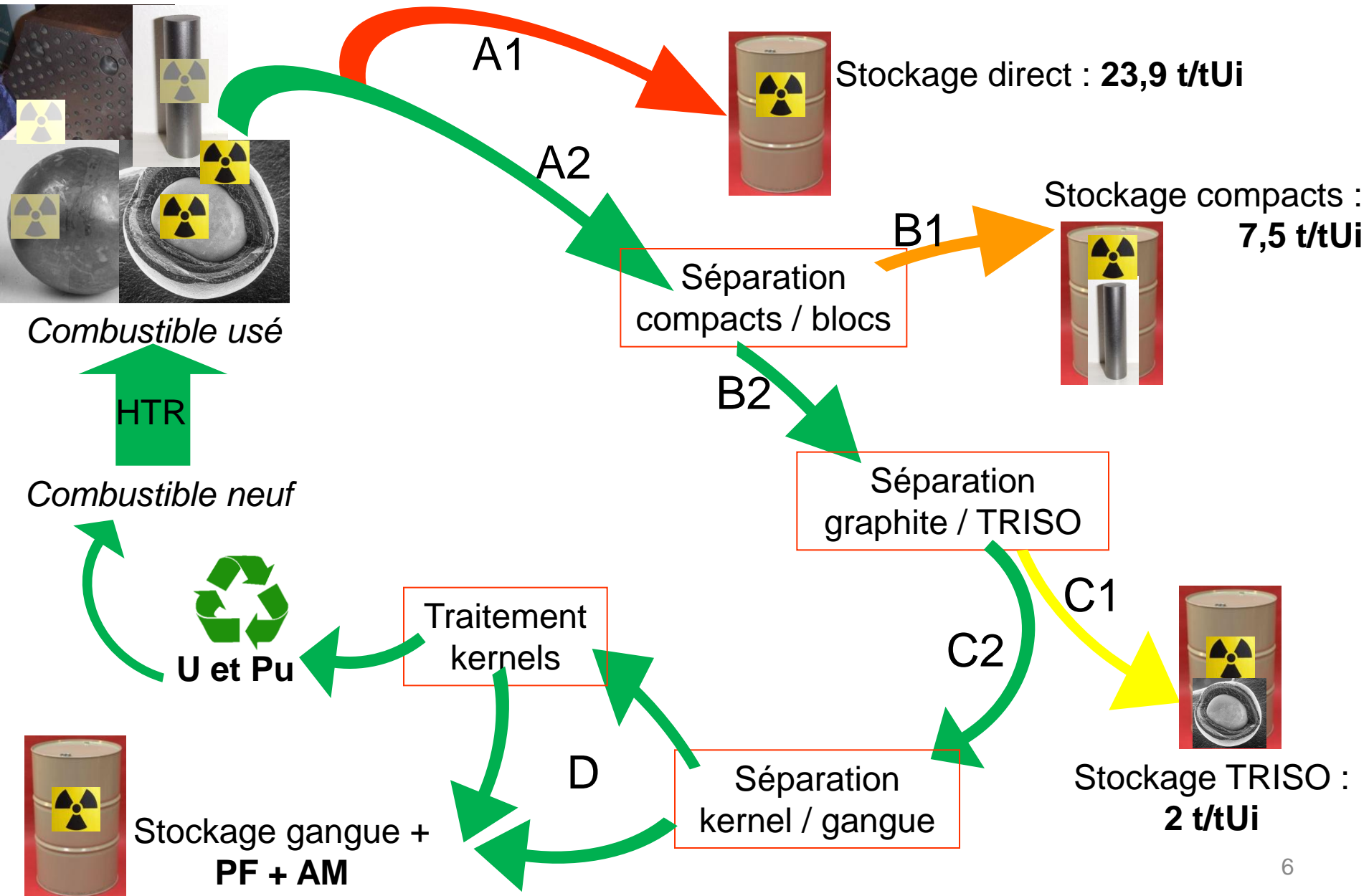


'pebble'

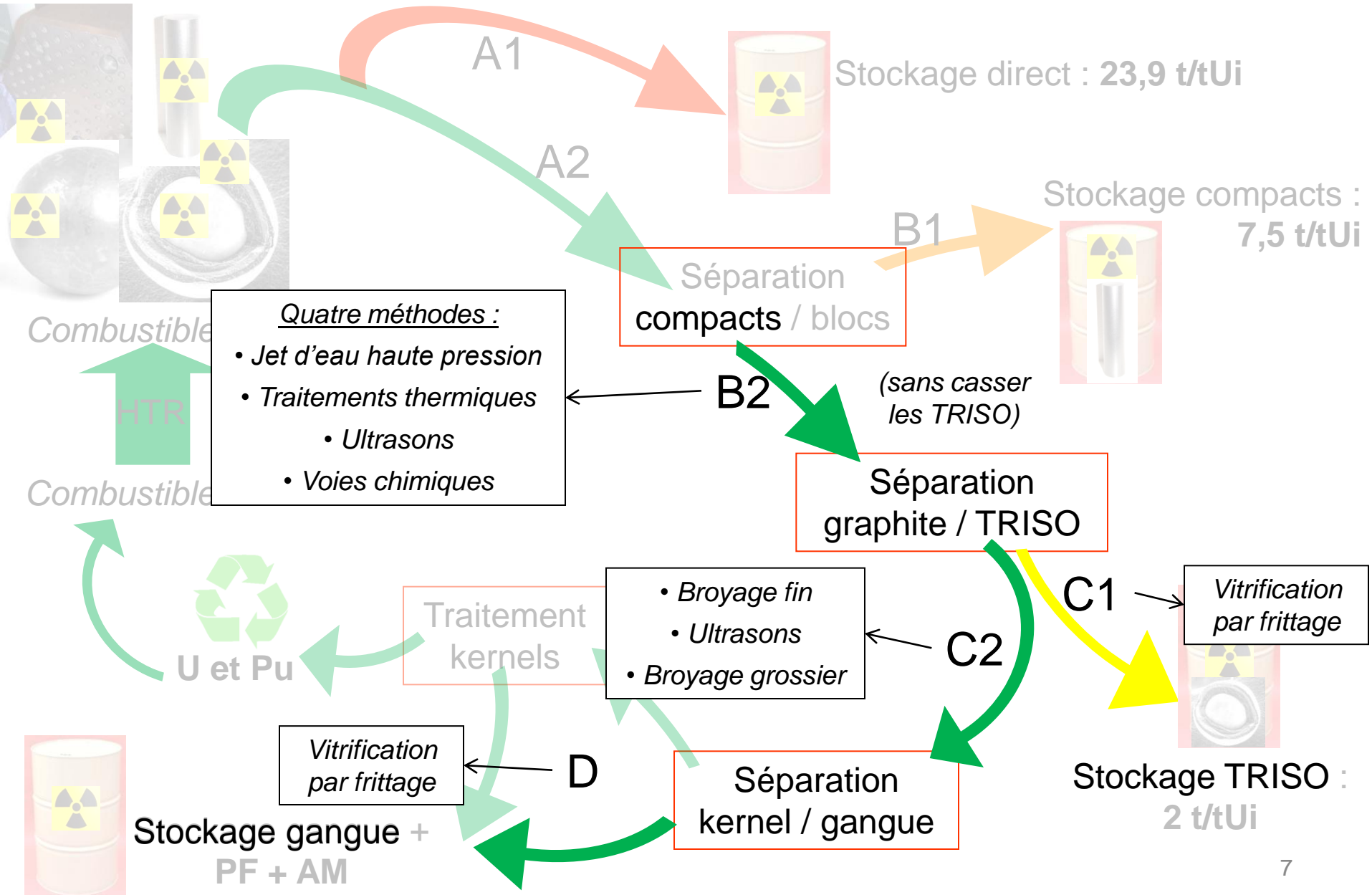


Etanchéité/confinement
Deux types de déchets

Traitements potentiels de ce combustible



Travaux de thèse



Plan de thèse

- B2 • Séparation graphite / particules TRISO
 - Par jet d'eau haute pression
 - Par traitements thermiques (choc ou combustion)
 - Par ultrasons (faible ou forte intensité)
 - Par voie chimique (conditions sévères ou douces)

- C2 • Séparation kernel / gangue

- C1/D • Vitrification des particules TRISO
 - Optimisation du frittage sans particule
 - Incorporation des particules (gangues / TRISO)
- Lixiviation des composites verre + TRISO
- Conclusions / Perspectives

Plan de thèse

- B2** • Séparation graphite / particules TRISO
 - Par jet d'eau haute pression
 - Par traitements thermiques (choc ou combustion)
 - Par ultrasons (faible ou forte intensité)
 - Par voie chimique (conditions sévères ou douces)
- C2** • Séparation kernel / gangue
- C1/D** • Vitrification des particules TRISO
 - Optimisation du frittage sans particule
 - Incorporation des particules (gangues / TRISO)
- Lixiviation des composites verre + TRISO
- Conclusions / Perspectives

Jet d'eau jusqu'à 4200 bar avec ou sans additifs :

- abrasifs (pouvoir d'érosion)
- polymères (cohérence du jet)

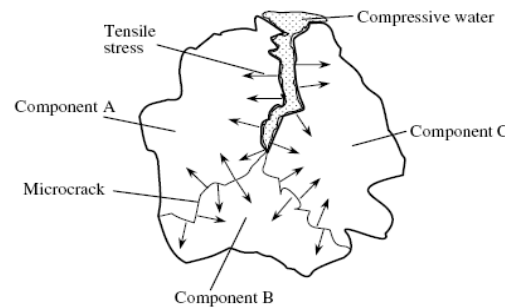
Applications :

Découpe

- Béton (jusqu'à 1 m)
- Acier (jusqu'à 30 cm)
- Plastique / Bois / Cuir
- Céramique / Verre

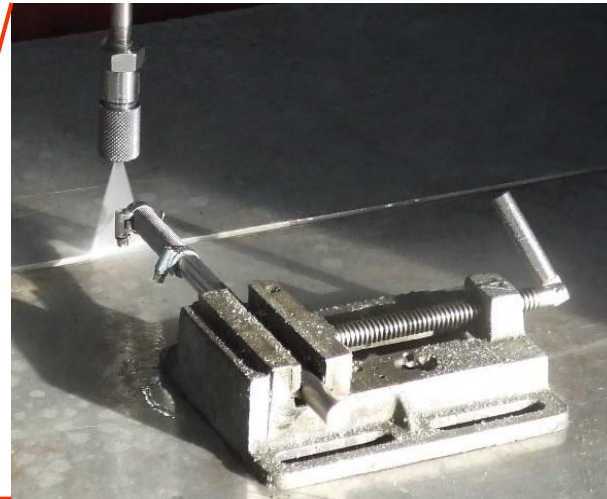
Hydrodémolition...

Béton



Ex : Découpe froide en milieu hostile :

Démantèlement de centrales nucléaires, installations chimiques, pétrolières



Test d'érosion des compacts à 1670 bar, jet plat 30°, d ~3 cm

$$Q = 0,46 \times \phi^2 \times \sqrt{p}$$

débit diamètre pression

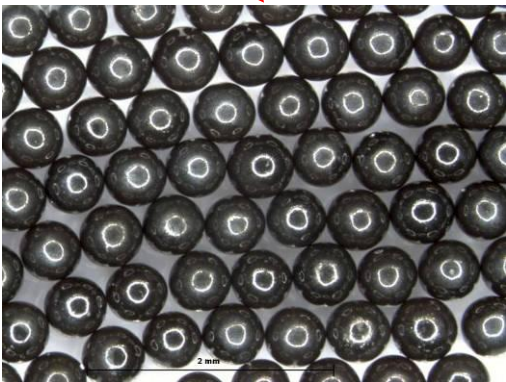
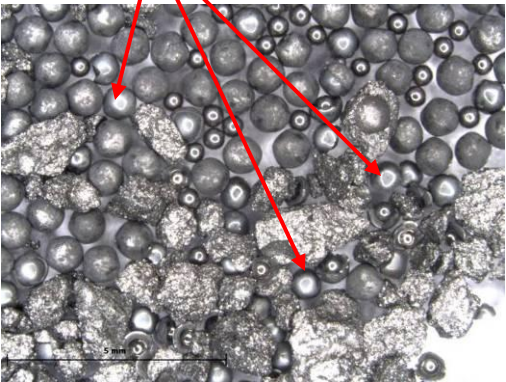
$$P = \frac{Q \times \rho}{600 \times \kappa}$$

puissance rendement

Séparation graphite / particules TRISO par jet d'eau haute pression : RESULTATS

N° test	% vol en Triso	Triso intacts (%)	Triso sans oPyC (%)	Triso sans gangue (%)	Erosion graphite (g/min)
A //	9,9	98,5	1,5	0	1,16
B ⊥	9,9	45,5	9,2	45,3	1,35
C //	20,9	85,7	8,4	5,8	1,99

0,18 kg/h total
 E ~740 Wh/compact



- Méthode non optimisée
- Problèmes d'intégrité des TRISO
- Méthode à risques, non poursuivie

Plan de thèse

- B2 • Séparation graphite / particules TRISO
 - Par jet d'eau haute pression
 - Par traitements thermiques (choc ou combustion)
 - Par ultrasons (faible ou forte intensité)
 - Par voie chimique (conditions sévères ou douces)
- C2 • Séparation kernel / gangue
- C1/D • Vitrification des particules TRISO
 - Optimisation du frittage sans particule
 - Incorporation des particules (gangues / TRISO)
- Lixiviation des composites verre + TRISO
- Conclusions / Perspectives

Théorie des chocs thermiques (Hasselman 60') :

$$R = \frac{\sigma (1 - \nu)}{E \alpha}$$

Rupture mécanique (~19 MPa) → σ

Résistance (K) → R

Module d'Young (~1,8 GPa) → E

Coefficient de Poisson (~0,065) → ν

Coefficient d'expansion thermique (~ $5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) → α

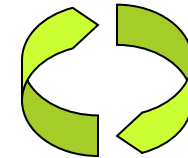
Application numérique pour les compacts : **R ~2000 K !**

→ Trempes thermiques difficiles...



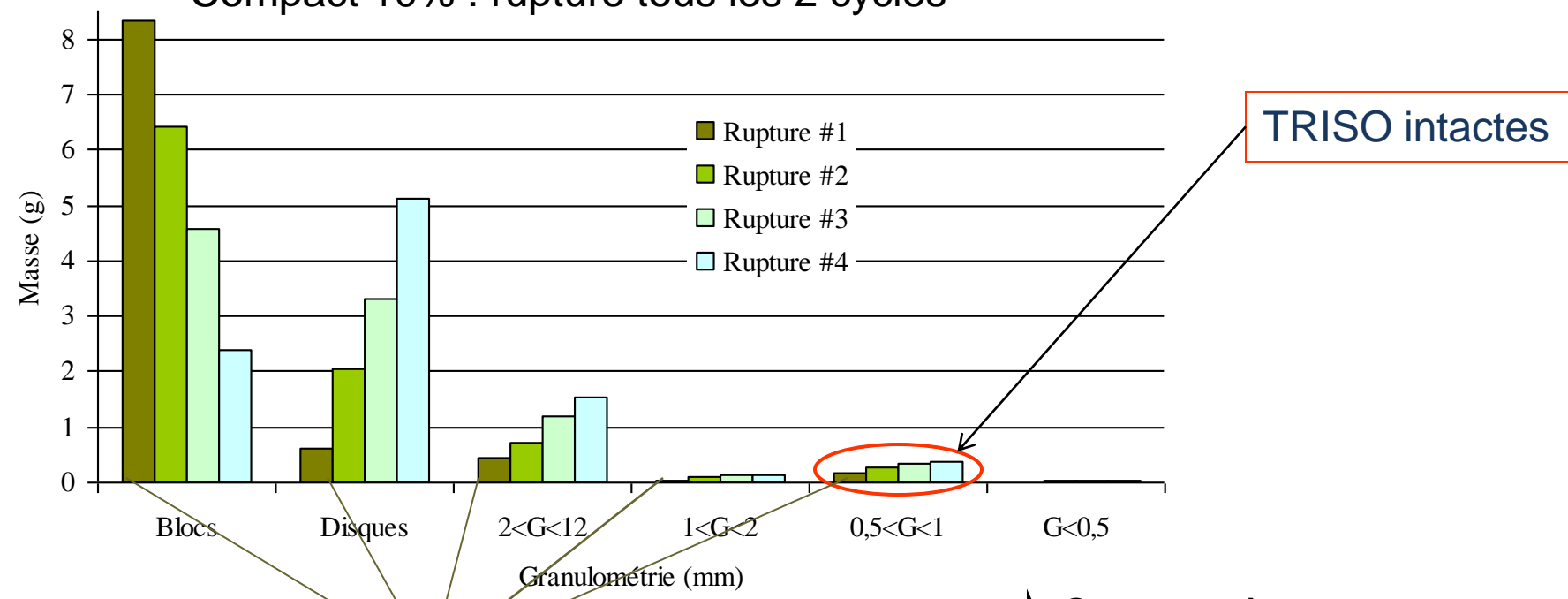
Exploitation de la porosité du graphite :

pénétration d'azote liquide (77 K), puis
évaporation brutale dans l'eau chaude (360 K)



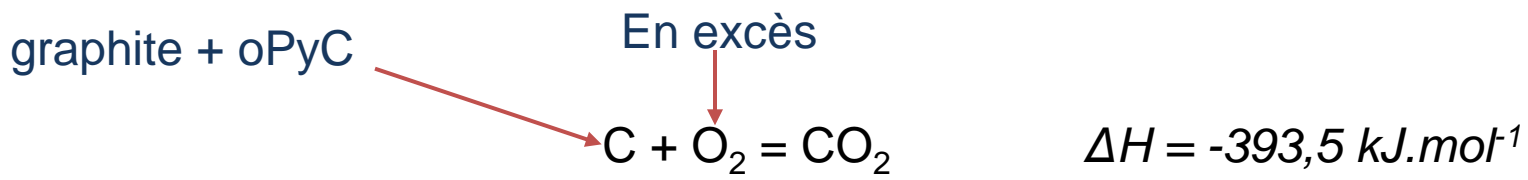
Plusieurs cycles

Compact 10% : rupture tous les 2 cycles



- ➔ Compact à 20% : meilleur comportement (moins de graphite en contact)
- ➔ Ne constitue pas une technique de séparation mais permet de diviser le compact en vue d'un traitement ultérieur (augmentation de la surface)

Séparation graphite / particules TRISO par combustion totale



air, 1100 K, 16 h

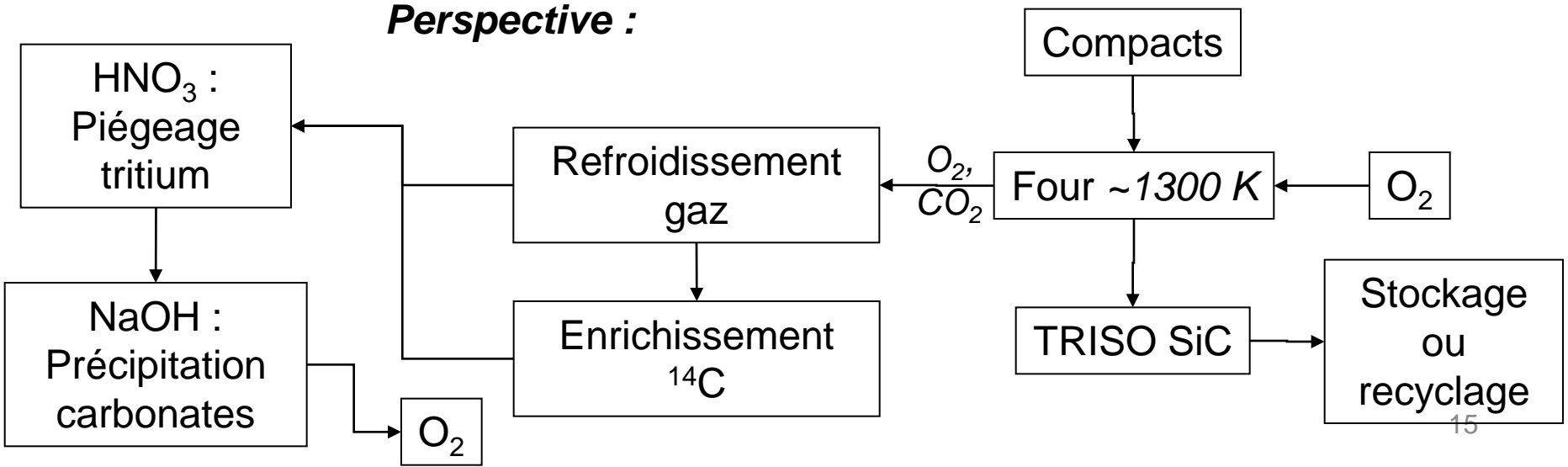


~1400 particules TRISO sans oPyC (SiC atteint)

Compact 10%

10 mm

Perspective :

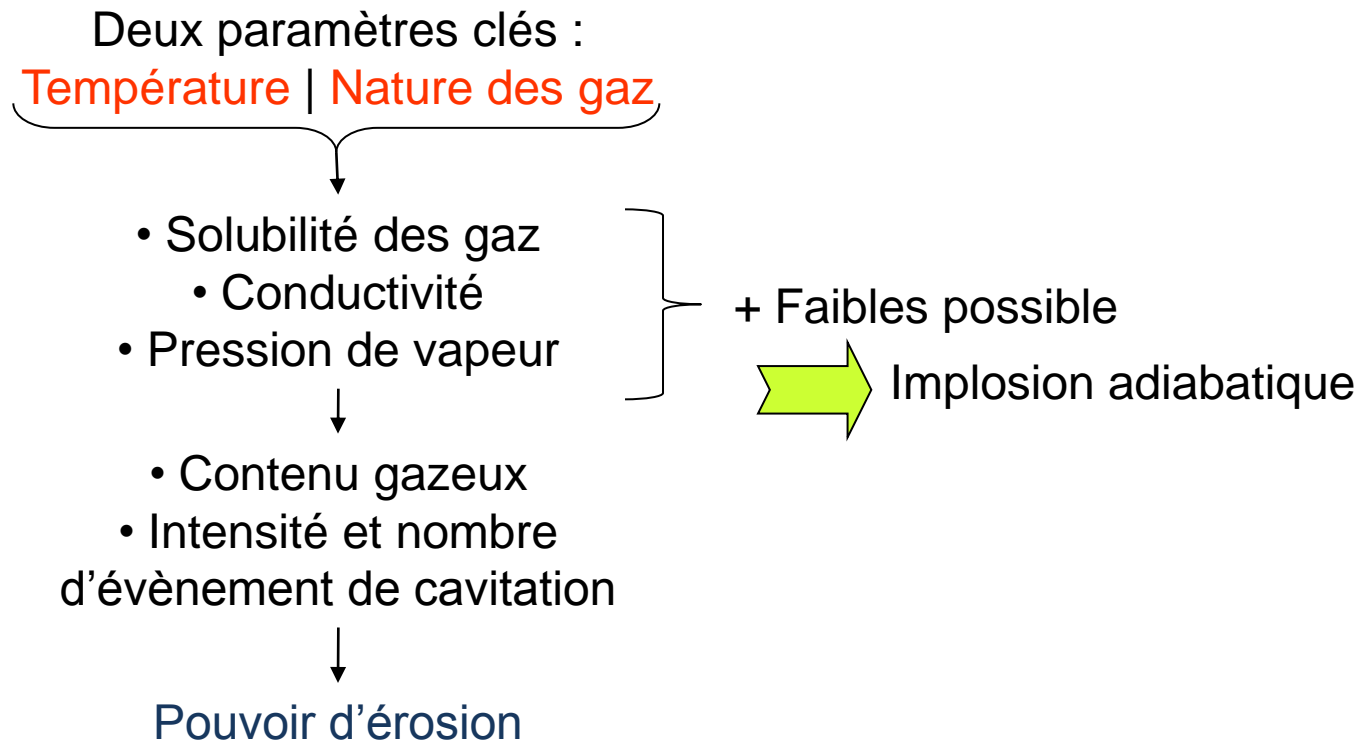


Plan de thèse

- B2** • Séparation graphite / particules TRISO
 - Par jet d'eau haute pression
 - Par traitements thermiques (choc ou combustion)
 - Par ultrasons (faible ou forte intensité)
 - Par voie chimique (conditions sévères ou douces)
- C2** • Séparation kernel / gangue
- C1/D** • Vitrification des particules TRISO
 - Optimisation du frittage sans particule
 - Incorporation des particules (gangues / TRISO)
- Lixiviation des composites verre + TRISO
- Conclusions / Perspectives

Erosion de solides par le phénomène de cavitation dans l'eau :

- 1) Nucléation de bulles dans l'eau (dépression)
- 2) Grossissement des bulles si stabilité ($D_{max} \sim 150 \mu m$ à 20 kHz)
- 3) Implosion brutale $\rightarrow E_{cinétique}$
 - $\rightarrow E_{thermique}$ (milliers de degrés)
 - $\rightarrow E_{potentielle}$ (milliers de bars)
- 4) Emission de jets à grande vitesse

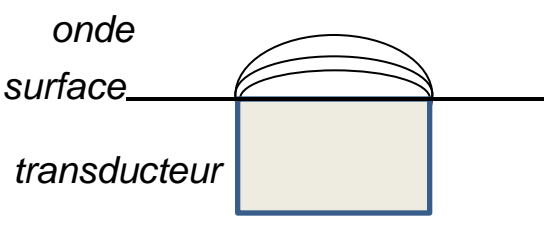


Deux Variantes :

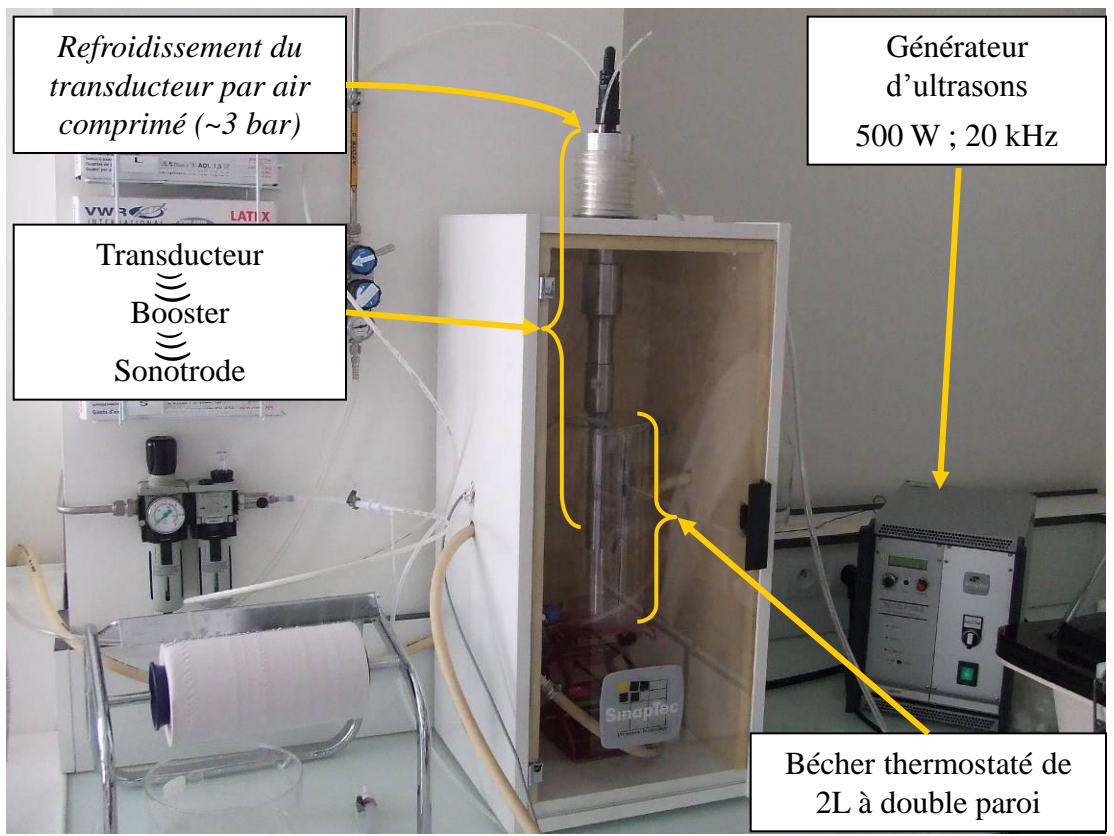
Faible intensité :
en bac



4 transducteurs de 80 W



Forte intensité : en réacteur

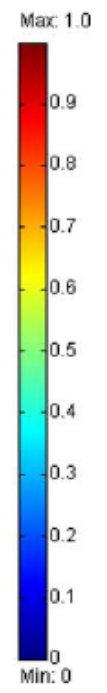


Refroidissement du transducteur par air comprimé (~3 bar)

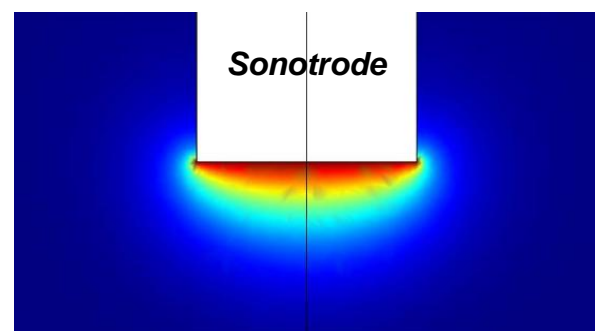
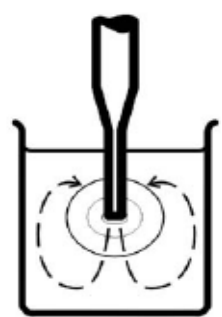
Transducteur
Booster
Sonotrode

Générateur d'ultrasons
500 W ; 20 kHz

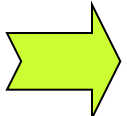
Bécher thermostaté de 2L à double paroi



Flux et intensité de l'onde :

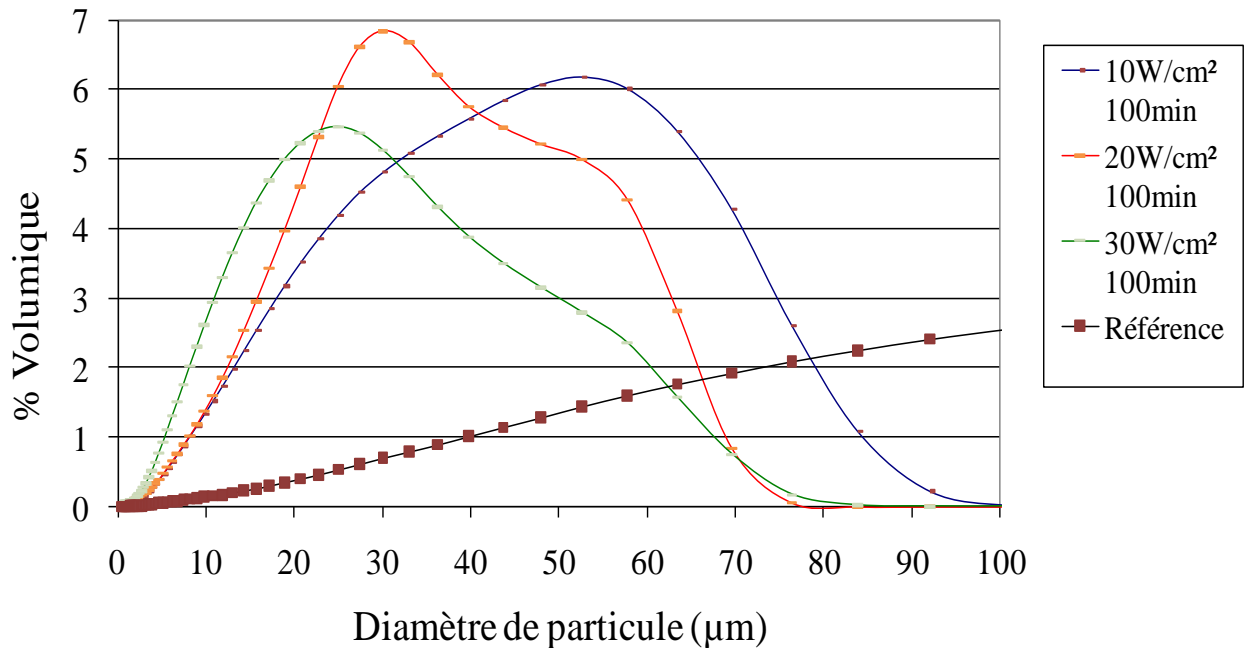


Comminution d'une poudre de graphite (< 630 μm, 1 g) suivie par granulométrie laser :

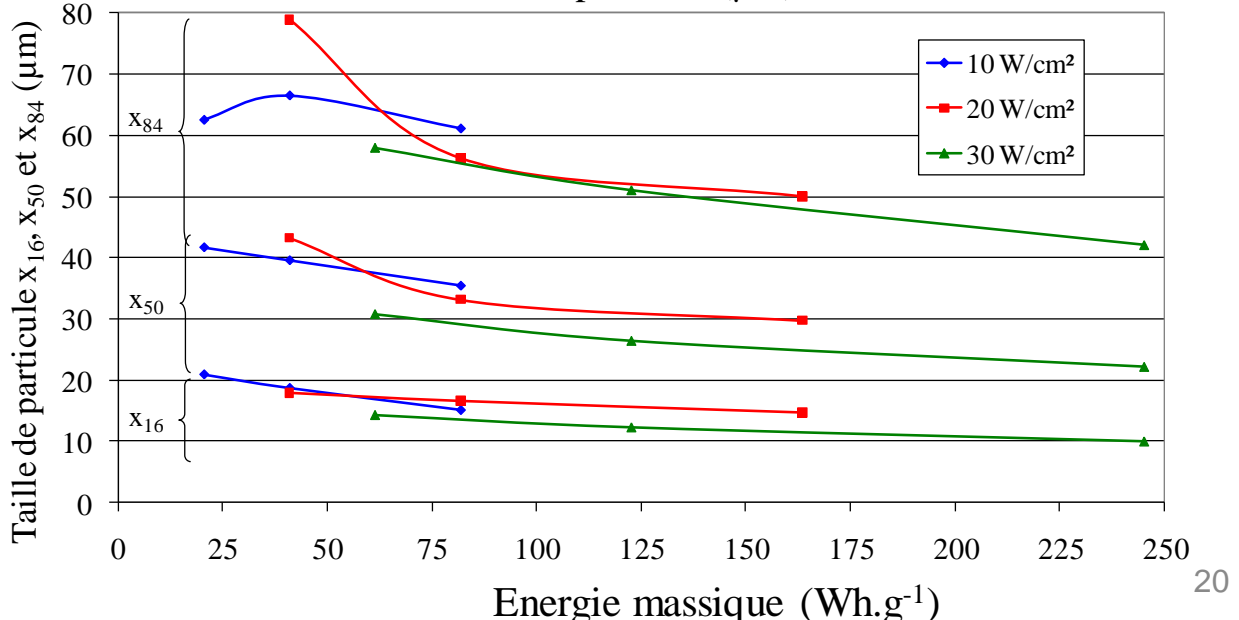


Décalage vers les plus faibles granulométries :

- en fonction de la durée du traitement
- en fonction de l'intensité des ultrasons



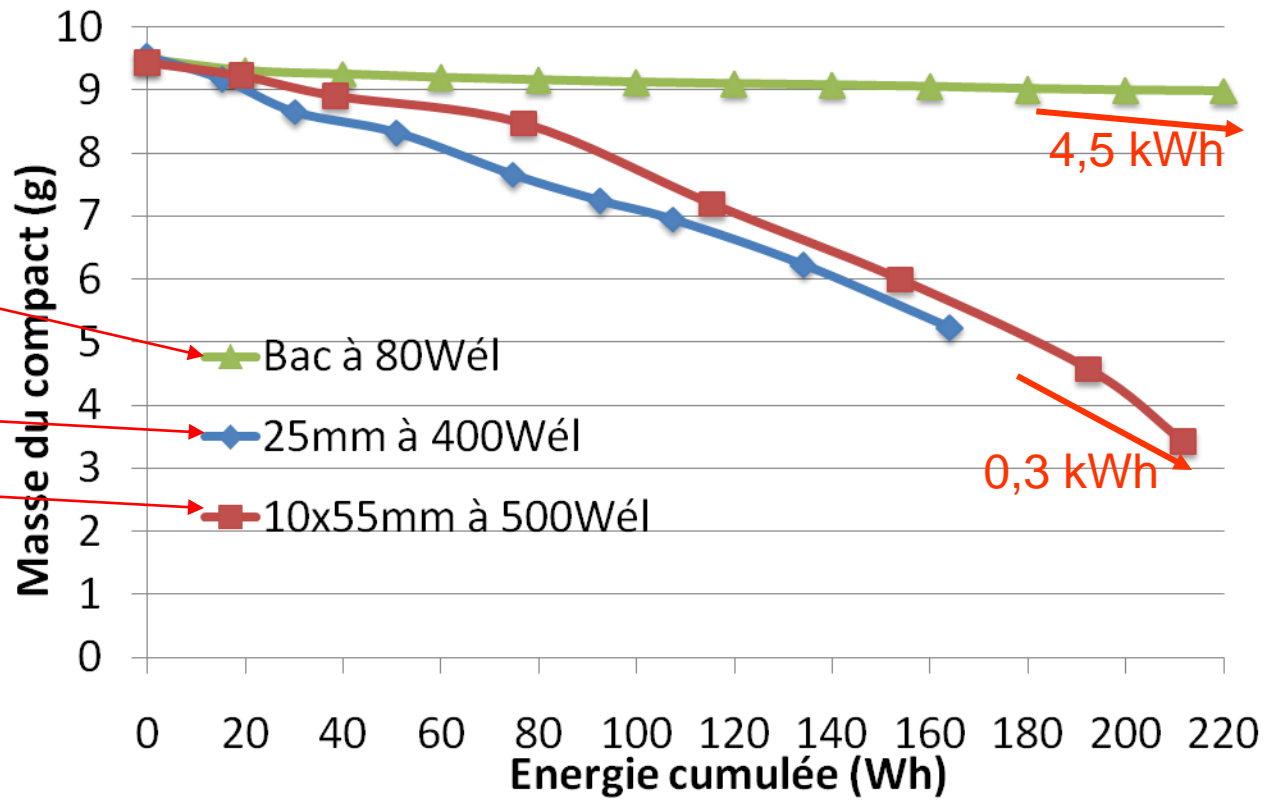
Pour une énergie donnée, une forte intensité favorise la comminution



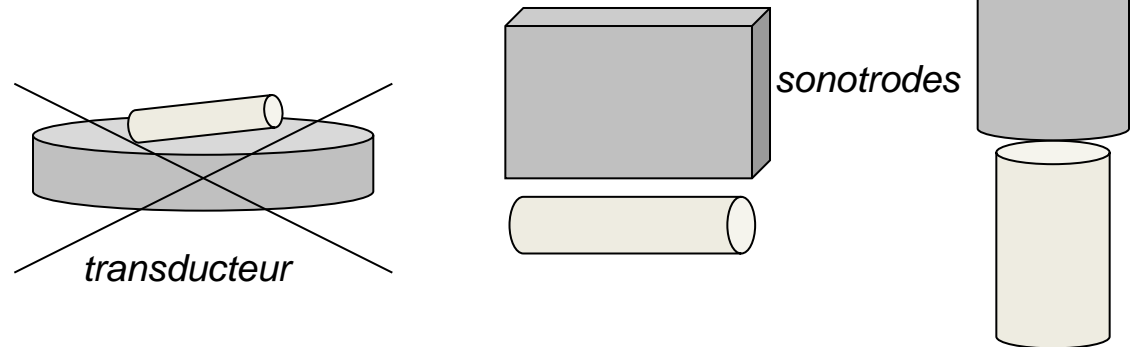
Séparation graphite / particules TRISO par ultrasons : RESULTATS (3/4)

Comparaison bac / réacteur :

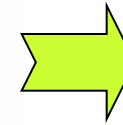
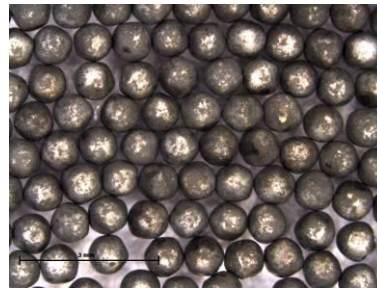
~6,4 W_e/cm^2
 ~81,6 W_e/cm^2
 ~90,9 W_e/cm^2



Privilégier les hautes intensités,
 Adapter la surface d'attaque :

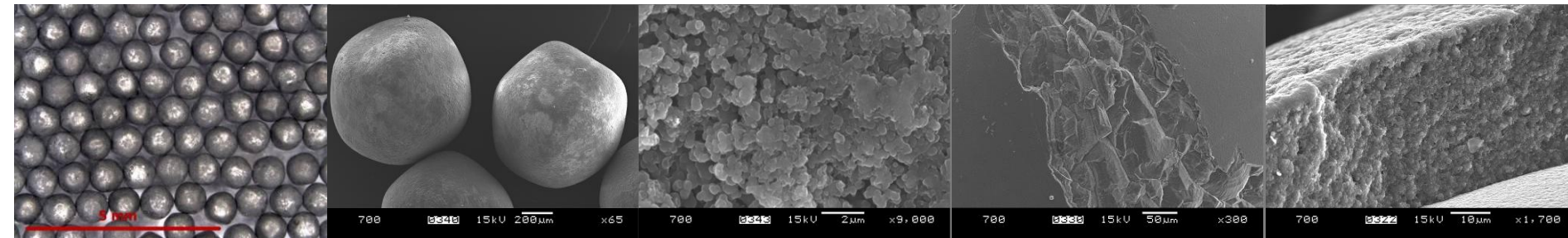


En bac :
100% de TRISO intacts



Procédé lent et coûteux
en énergie

En réacteur : besoin d'un compromis puissance / distance sonotrode-compact

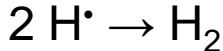
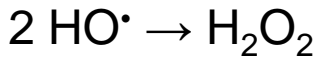


Contact TRISO-Sonotrode → risque de rupture de gangue (même à faible puissance)

Augmentation distance sonotrode-compact → augmentation puissance de travail

Réactions de sonolyse de l'eau,
réactions radicalaires :

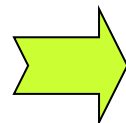
Eau
pure



+ O₂



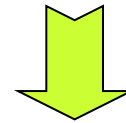
+ N₂



Diminution du pH (<4)

Formation de nitrates (4 ppm/h à 20 W/cm²)

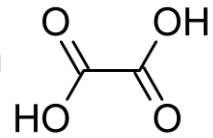
Présence d'oxydants et
de réducteurs puissants



Réaction sur la matière
carbonée (+ faible
détection de H₂O₂)

- Existe décomposition polluants organiques par cycle de Fenton / Sono-Fenton (ouverture de cycles...)

- Exemple : 100 ppm



)>) 2 H₂CO₃ destruction ~9,2 ppm/h à 20 W/cm²

→ Possibilité de rupture des liaisons du graphite ?



Nouveaux composés ?

Sonication de graphite (1 g/L) → [mat.orga.] ~3-4 ppm

Micro-extraction en phase solide SPME/GC/MS :

- diminution du signal des composés initialement présents → destruction
- toluène constant
- 3 à 4 fois plus de styrène



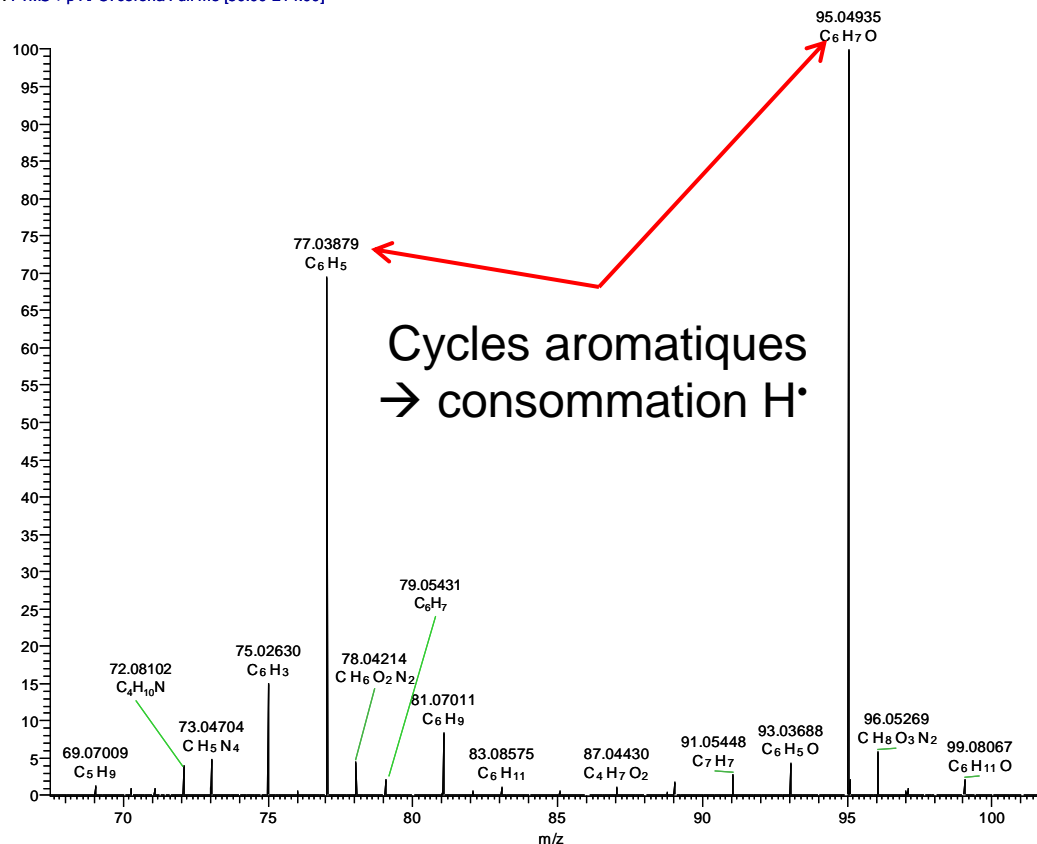
Génération ou désorption par la comminution ?



Etudes à venir : lavage initial du graphite ou avec HOPG

Ionisation chimique à pression atmosphérique APCI

eau sonifiée HR #10 RT: 0.09 AV: 1 NL: 3.41E6
T: FTMS + p APCI corona Full ms [50.00-214.00]



Cycles aromatiques
→ consommation H⁺

APCI - : acides carboxyliques (C₂-C₁₀)...

→ consommation HO[•]

Plan de thèse

- B2 • Séparation graphite / particules TRISO
 - Par jet d'eau haute pression
 - Par traitements thermiques (choc ou combustion)
 - Par ultrasons (faible ou forte intensité)
 - Par voie chimique (conditions sévères ou douces)

- C2 • Séparation kernel / gangue

- C1/D • Vitrification des particules TRISO
 - Optimisation du frittage sans particule
 - Incorporation des particules (gangues / TRISO)
- Lixiviation des composites verre + TRISO
- Conclusions / Perspectives

Intercalation d'acide sulfurique dans le graphite

Avec HNO_3 sous micro-ondes

En four minéralisateur

Mélange de H_2SO_4 95% et HNO_3 69% ($\rightarrow \text{NO}_2^+$) en réacteur

\rightarrow échantillons **SxNy**

Conditions :

P = 1400 W (140 W/min)

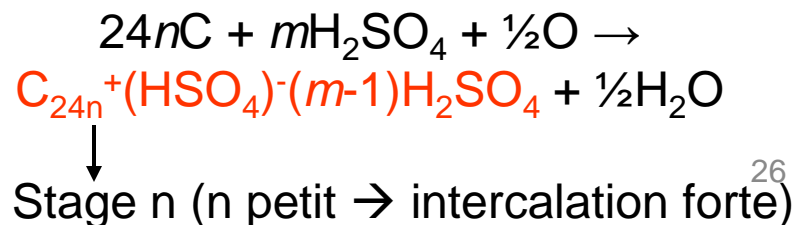
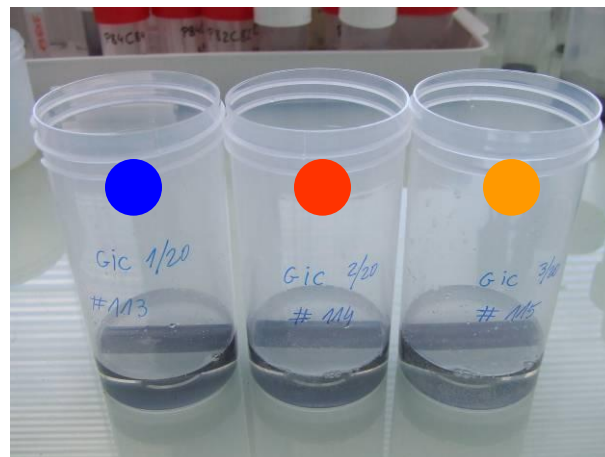
T = 200 °C

Pression : ~55 bar

Plateau : 15 min

Avec H_2O_2 sous CNTP

- 1) Un compact entier par flacon
- 2) Oxydation du graphite par H_2O_2 50% (1, 2, 3, 4 mL)
- 3) Ajout de l'acide sulfurique H_2SO_4 95% (20 mL)
- 4) Quelques minutes de réaction



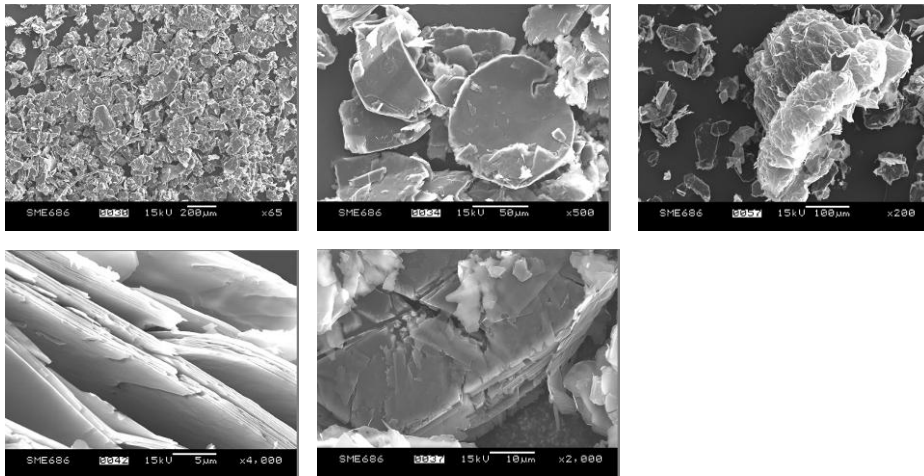
Dans les deux cas : **libération de toutes les particules TRISO du graphite**

- Effet macroscopique : séparation grains ;
- Effet microscopique : gonflement grains → écartement feuillets → intercalation H_2SO_4

Avec HNO_3 sous micro-ondes

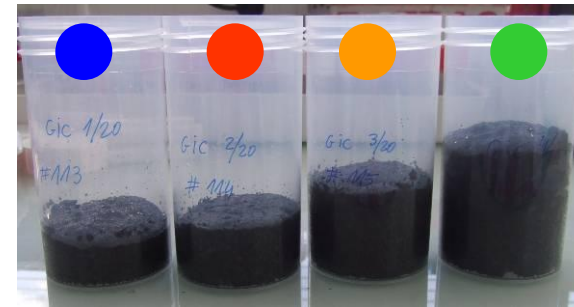
Avec n'importe quel ratio HNO_3/H_2SO_4 (x et $y \neq 0$)

Après plusieurs rinçages :



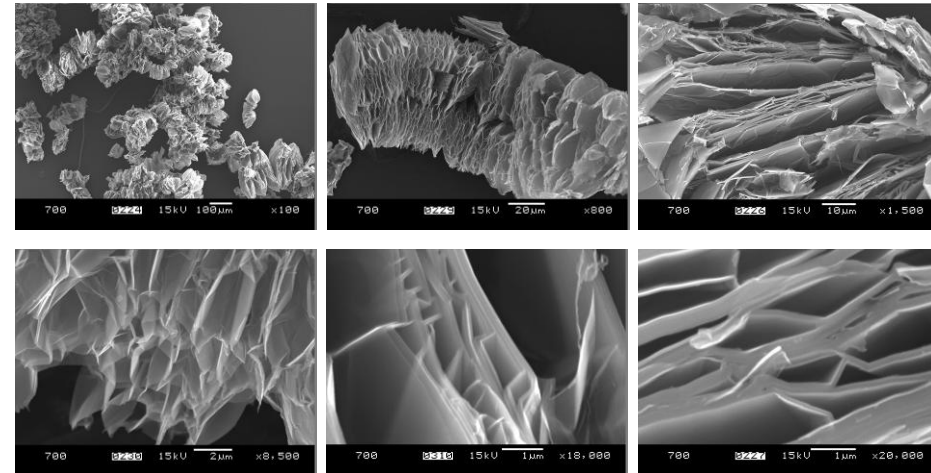
Gonflement des grains,
oxydation du graphite,
exfoliation partielle

Avec H_2O_2 sous CNTP



Augmentation
du volume
500 à 1600%

Après un lavage :

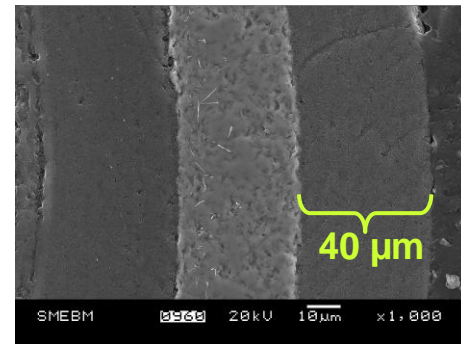
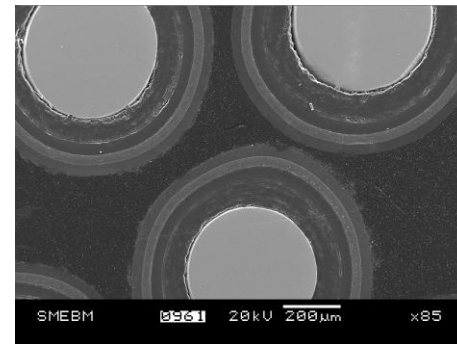
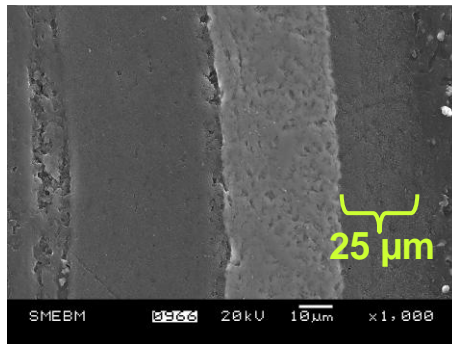
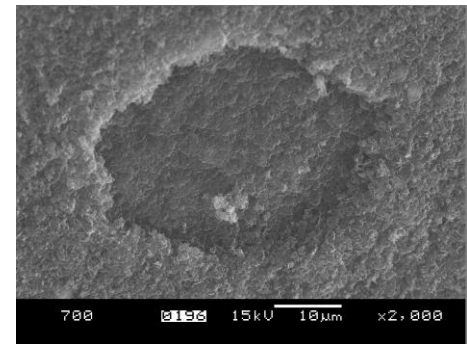
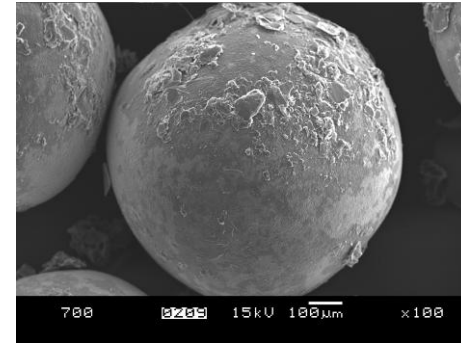
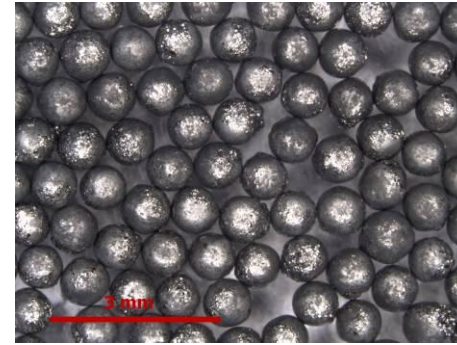
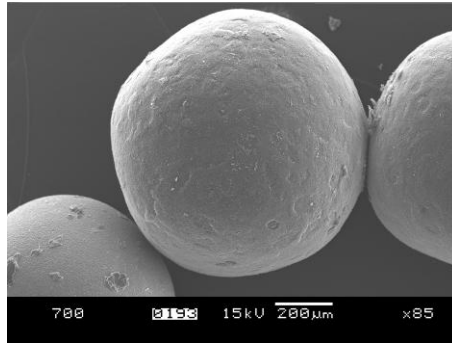


Gonflement plus important des grains³⁷

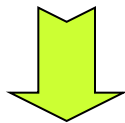
Etats des particules TRISO

Avec HNO_3 sous micro-ondes

Avec H_2O_2 sous CNTP



Surface cratérée, épaisseur de oPyC diminuée (oxydation)



Conditions trop sévères
(mais SiC préservé)

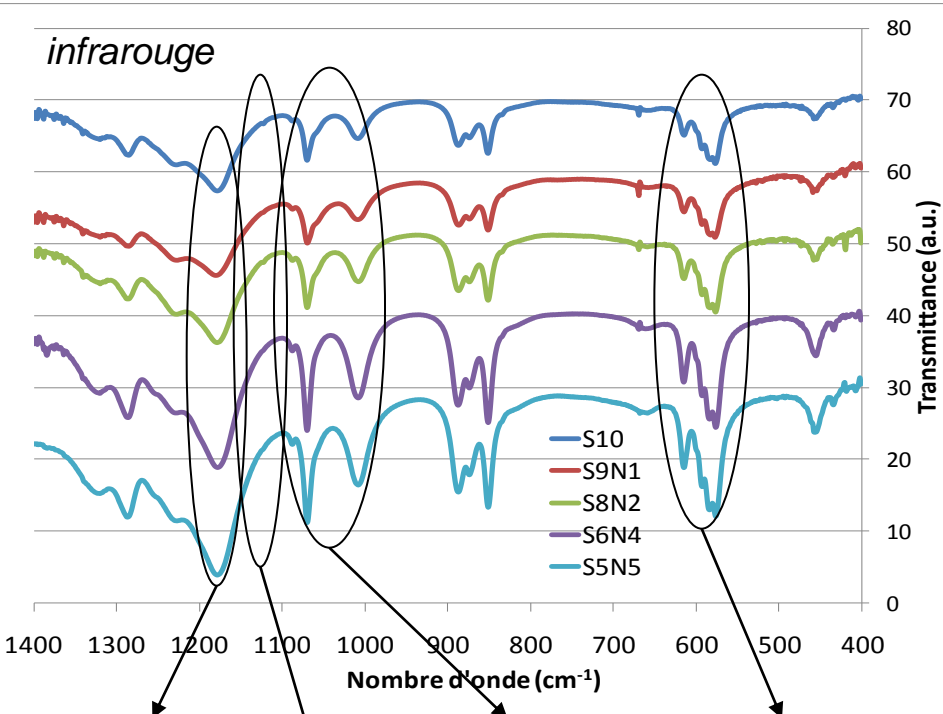
Surface moins propre
mais non oxydée



TRISO bien conservées à
n'importe quel ratio H_2O_2/H_2SO_4

Propriétés des composés intercalés de graphite (GIC)

Avec HNO₃ sous micro-ondes

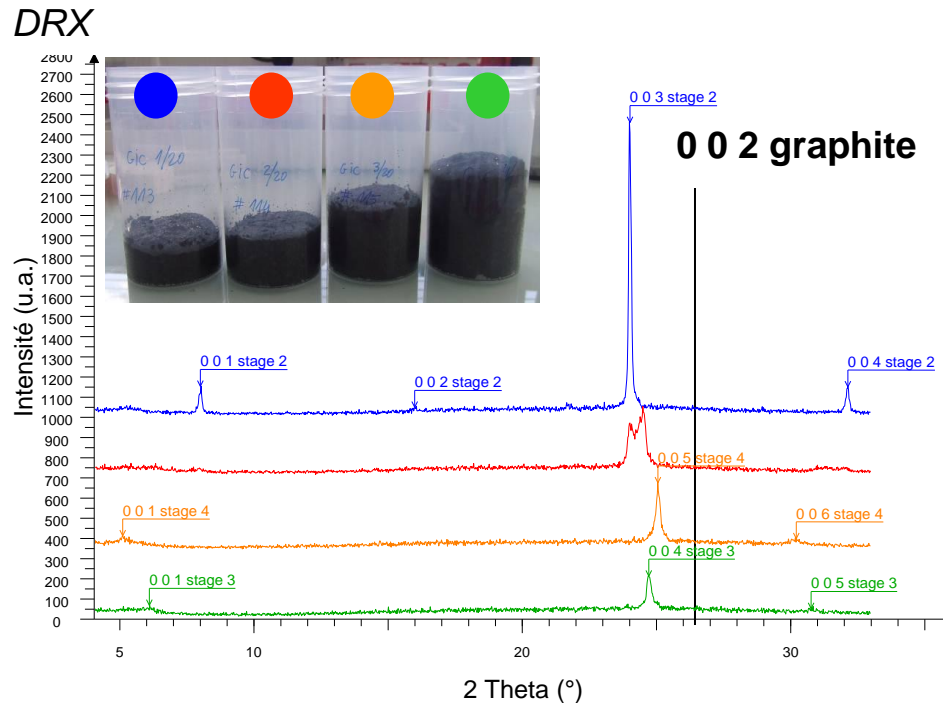


1181 cm⁻¹ : liaisons sulfate covalent
 Absence de sulfate ionique
 1010, 1070 cm⁻¹ : liaisons S=O
 576-615 cm⁻¹ : liaisons sulfate covalent

SxNy : mêmes spectres (même composé)

→ H₂SO₄ lié au graphite

Avec H₂O₂ sous CNTP



- Phases pures, sans graphite
- 1:20 meilleur ratio pour l'intercalation (sans recourt à l'électrochimie).
- Quand H₂O₂ en excès : décomposition en O₂ → gonflement.

Exfoliation du graphite

(facilité de séparation des TRISO et valorisation du graphite)

Avec HNO₃ sous micro-ondes



Avec H₂O₂ sous CNTP

Passage au four :
1 min à 1000 °C

En cas d'application :
traitement des gaz



Gaz formés : augmentation pression → écartement des feuillets



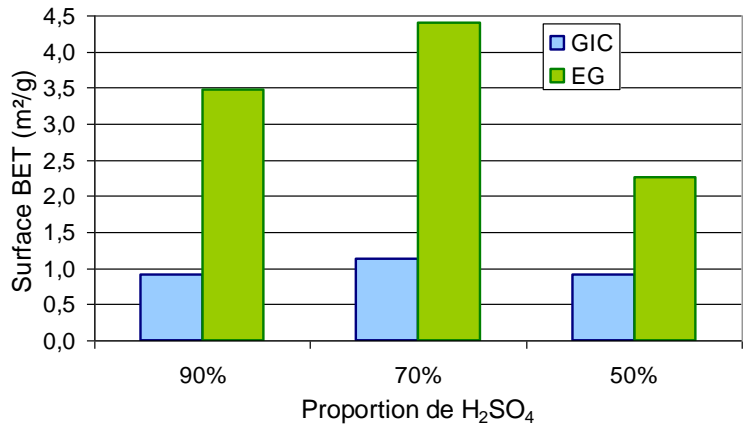
EXFOLIATION



Bonne résistance
à l'oxydation

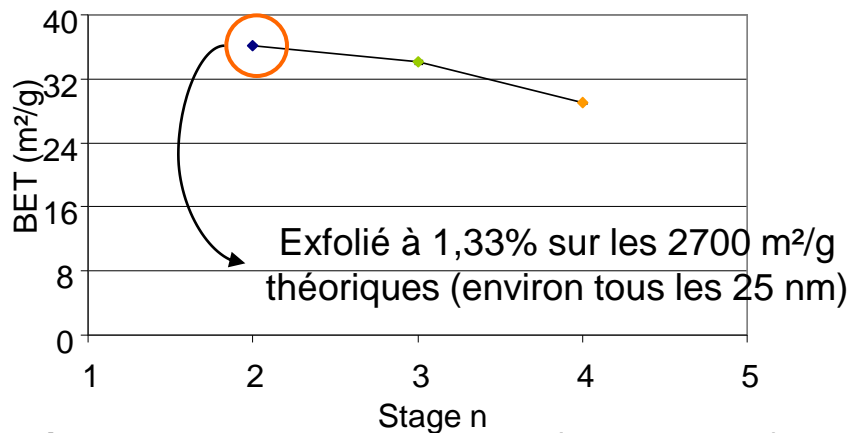
Propriétés du graphite exfolié (EG)

Avec HNO₃ sous micro-ondes



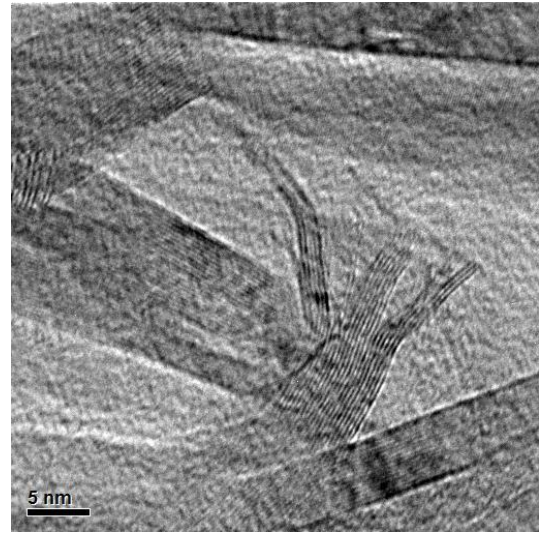
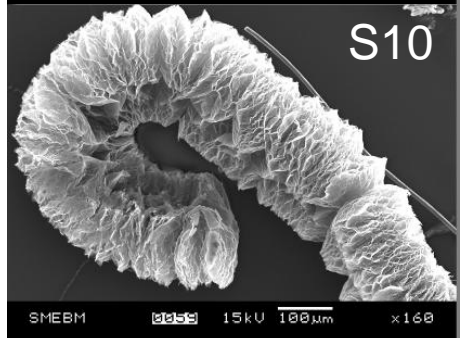
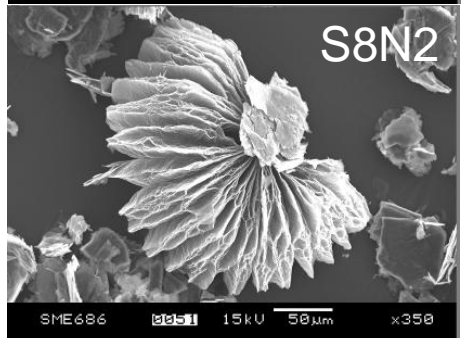
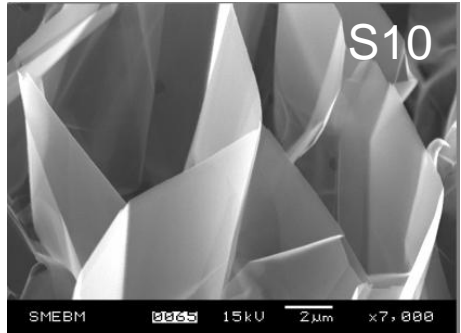
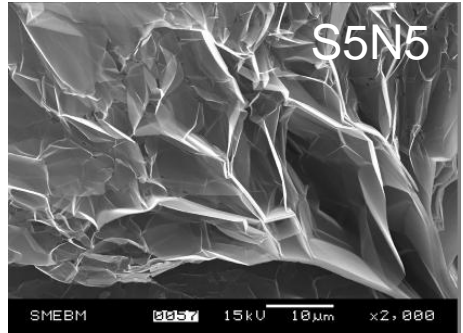
~x3 : augmentation modérée (lavage)

Avec H₂O₂ sous CNTP



x29 à x36 : forte augmentation (pas lavage)

Exfolié à 1,33% sur les 2700 m²/g théoriques (environ tous les 25 nm)

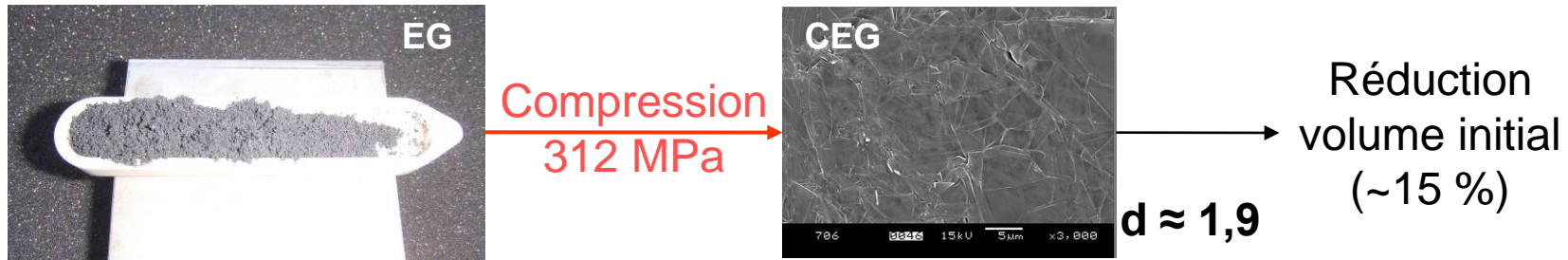


Augmentation surface spécifique,

baisse densité
($d_{worms} \approx 0,015$;
 $\rho_{worms} \approx 99\%$)



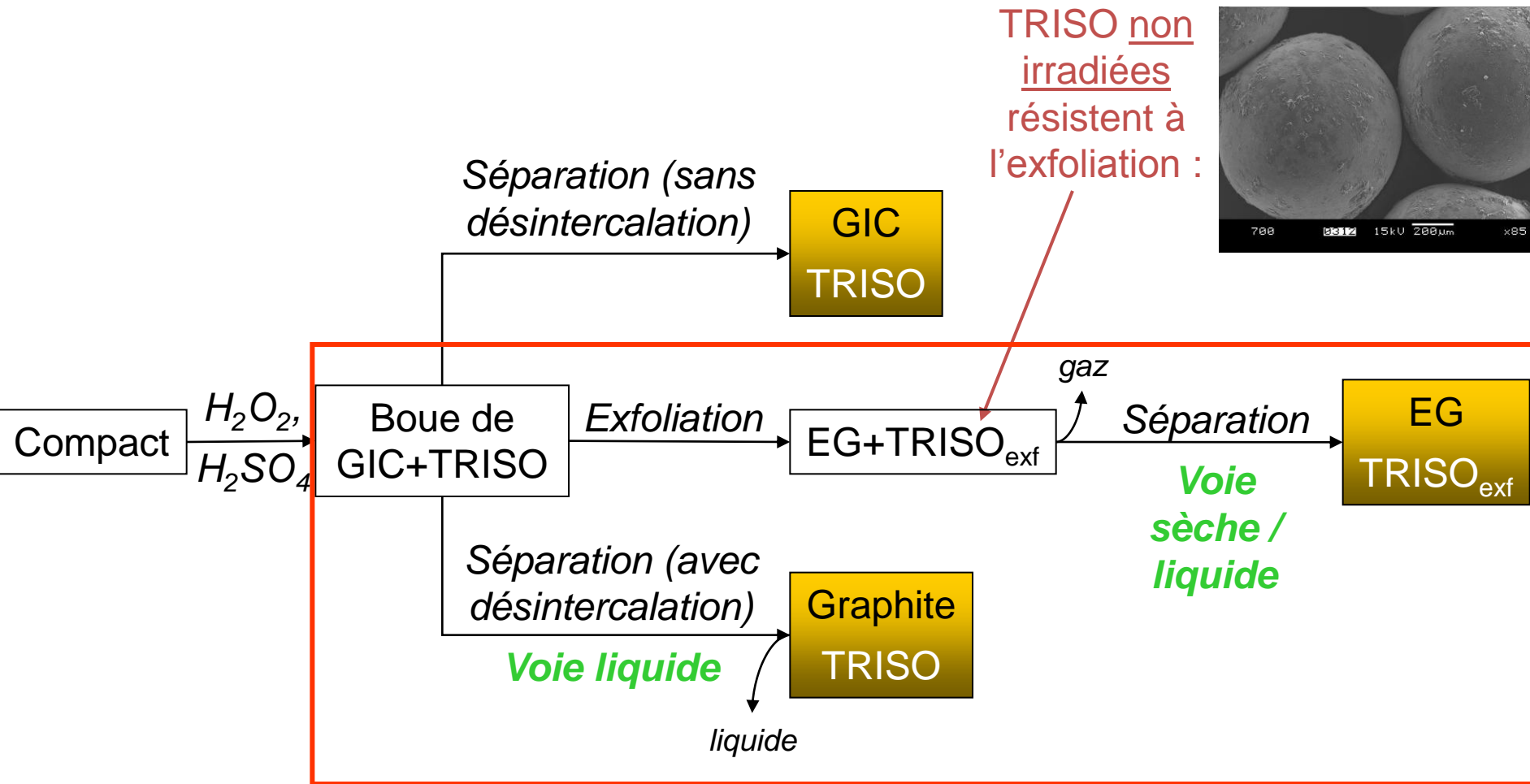
Micro-ondes pas nécessaires 31



De nombreux avantages :

- Grandes quantités traitées simultanément **sans apport d'énergie externe** (toutes les particules libérées)
- Réactions très rapides
- Très peu d'effluents liquides (mais gazeux si exfoliation)
- Les EG et CEG ont des applications industrielles :
 - joints
 - extincteurs de feu
 - isolants thermiques
 - électrodes
 - réactifs chimiques
 - adsorbants
 - lubrifiants ...

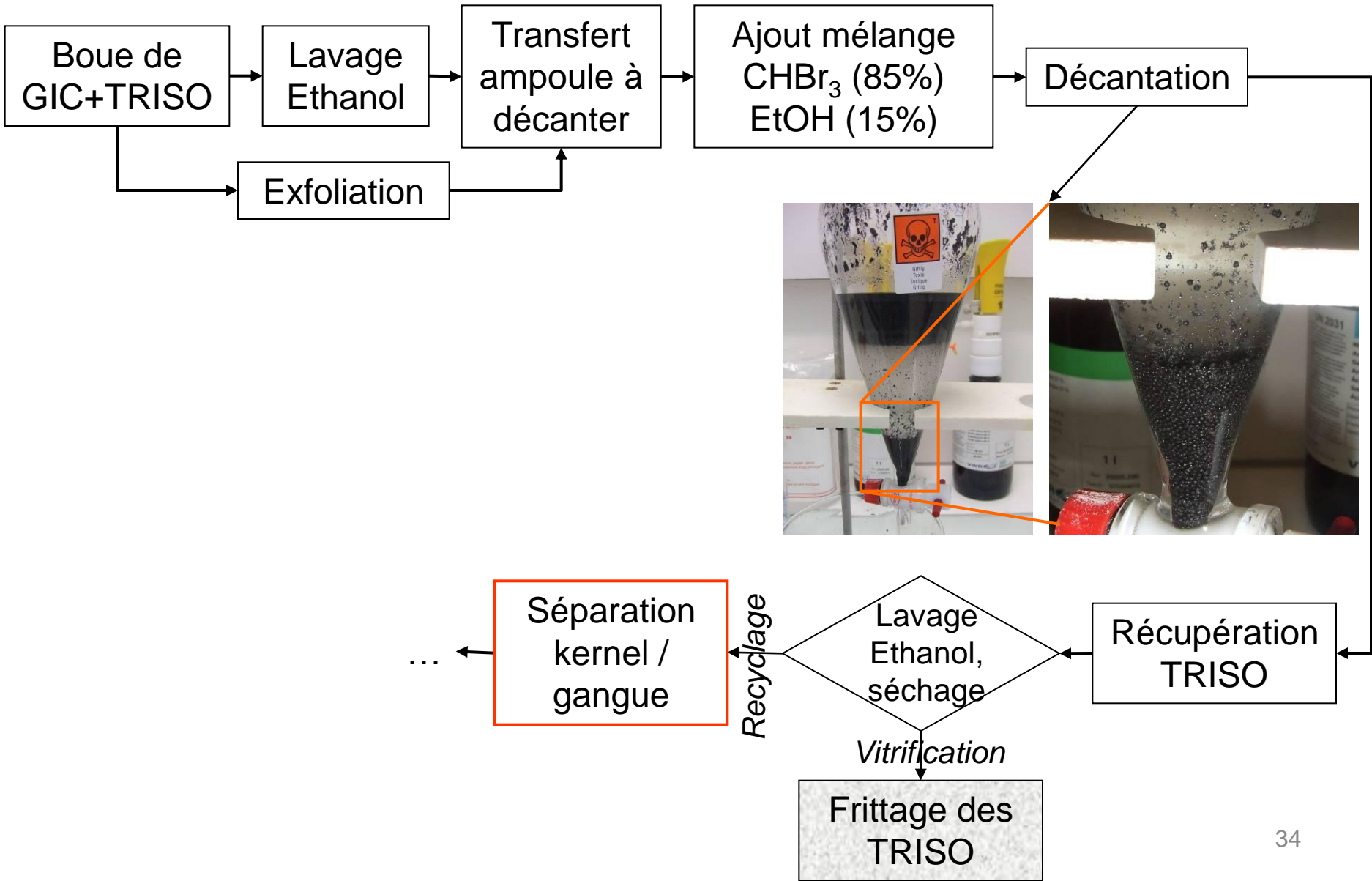
Séparation graphite / particules TRISO par voie acide : **SEPARATION FINALE**



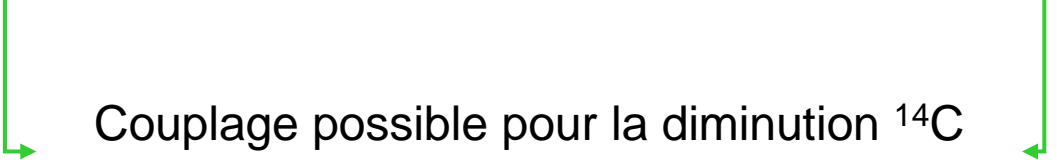
Voies liquides explorées

Séparation graphite / particules TRISO par voie acide : SEPARATION FINALE

$$d_{\text{Graphite}} = 2,26 < d_{\text{Bromoforme}} = 2,89 < d_{\text{TRISO Zr}} = 2,93 < d_{\text{TRISO U}} = 3,54$$



Méthode	Choc thermique	Combustion totale	Jet d'eau haute pression	Ultrasons de faible intensité (en bac)	Ultrasons de haute intensité (en réacteur)	Intercala-tion via micro-ondes	Intercala-tion sous CNTP	<i>Courants pulsés du CEA</i>
<u>Energie massique</u> extérieure (Wh/g)	-	très variable	74	450	28	variable	0	280
Effluents aqueux	oui	non	oui	oui	oui	oui	très faibles	oui
Effluents gazeux	non	nombreux	non	faibles	faibles	oui	oui/non	non
Adapta-tion milieu chaud	?	★ ★ ★	non	★ ★ ★	★	★	★ ★ ★ (vérifier exfoliation)	?



 Couplage possible pour la diminution ¹⁴C
 (Fachinger, Podruhzina, von Lensa, 2008)

Plan de thèse

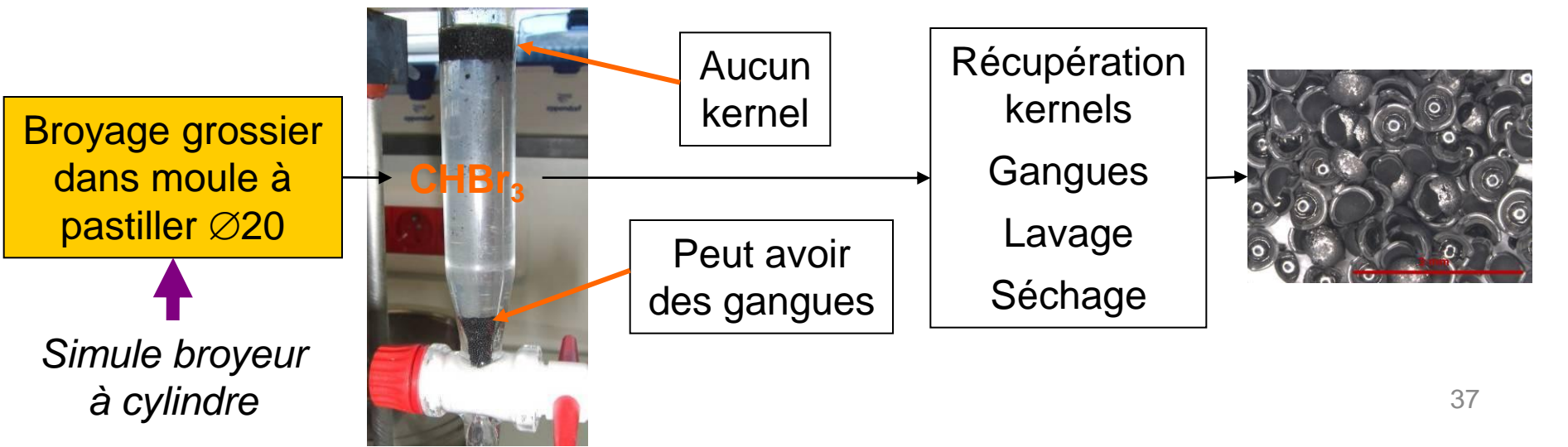
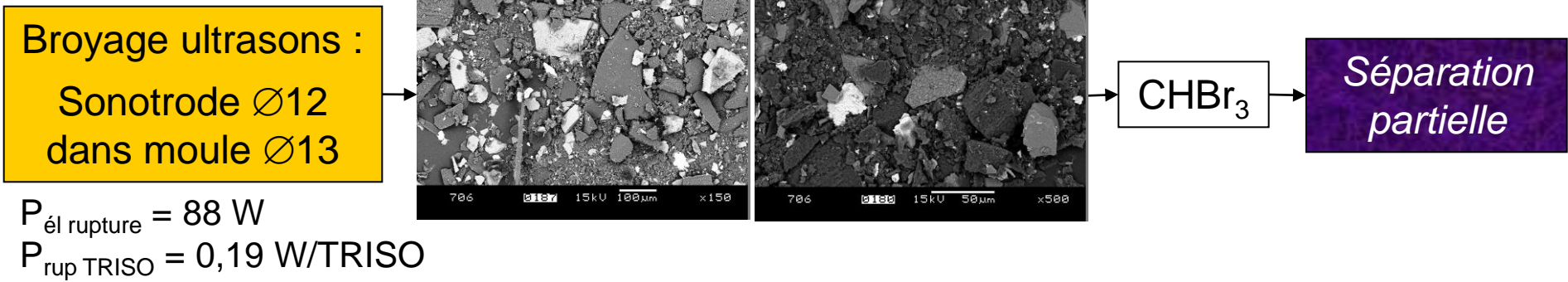
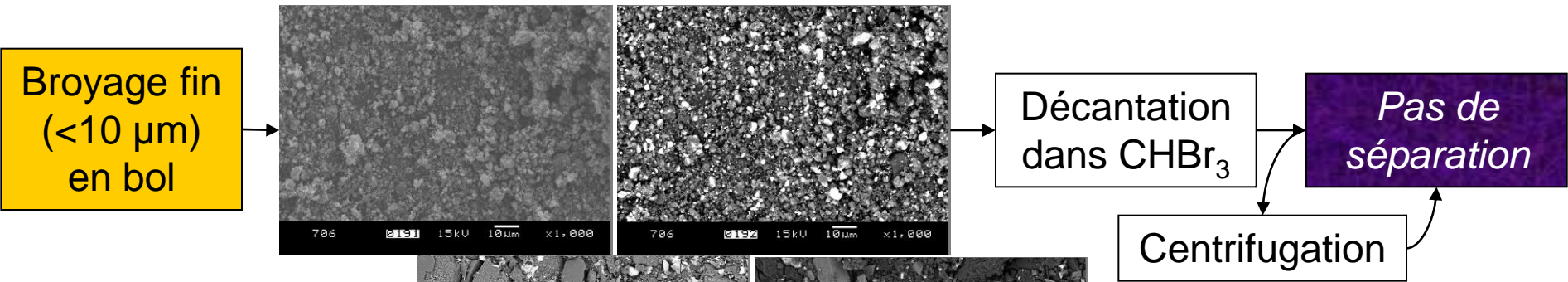
- B2** • Séparation graphite / particules TRISO
 - Par jet d'eau haute pression
 - Par traitements thermiques (choc ou combustion)
 - Par ultrasons (faible ou forte intensité)
 - Par voie chimique (conditions sévères ou douces)

- C2** • Séparation kernel / gangue

- C1/D** • Vitrification des particules TRISO
 - Optimisation du frittage sans particule
 - Incorporation des particules (gangues / TRISO)
- Lixiviation des composites verre + TRISO
- Conclusions / Perspectives

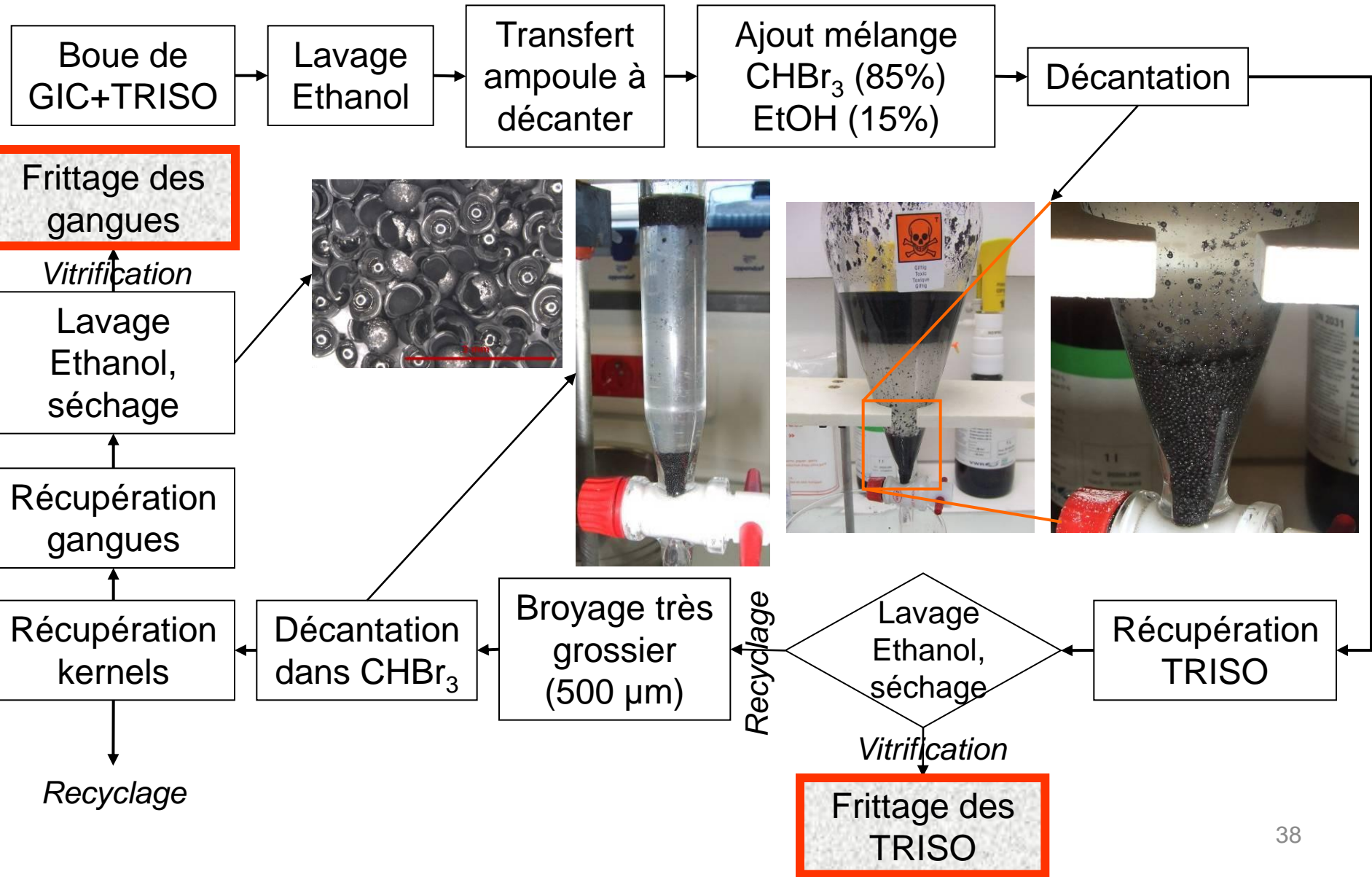
Séparation kernel / gangue : TROIS METHODES

$$d_{\text{gangue}} \sim 2,1 < d_{\text{Bromoforme}} = 2,89 < d_{\text{ZrO}_2} \approx 6 < d_{\text{UO}_2} \approx 11$$



Séparation kernel / gangue : SEPARATION FINALE

$$d_{Gangue} \sim 2,1 < d_{Graphite} = 2,26 < d_{Bromoforme} = 2,89 < d_{TRISO\ Zr} = 2,93 < d_{TRISO\ U} = 3,54$$



Plan de thèse

- B2 • Séparation graphite / particules TRISO
 - Par jet d'eau haute pression
 - Par traitements thermiques (choc ou combustion)
 - Par ultrasons (faible ou forte intensité)
 - Par voie chimique (conditions sévères ou douces)

- C2 • Séparation kernel / gangue

- C1/D • **Vitrification des particules TRISO**
 - Optimisation du frittage sans particule
 - Incorporation des particules (gangues / TRISO)
- Lixiviation des composites verre + TRISO
- Conclusions / Perspectives

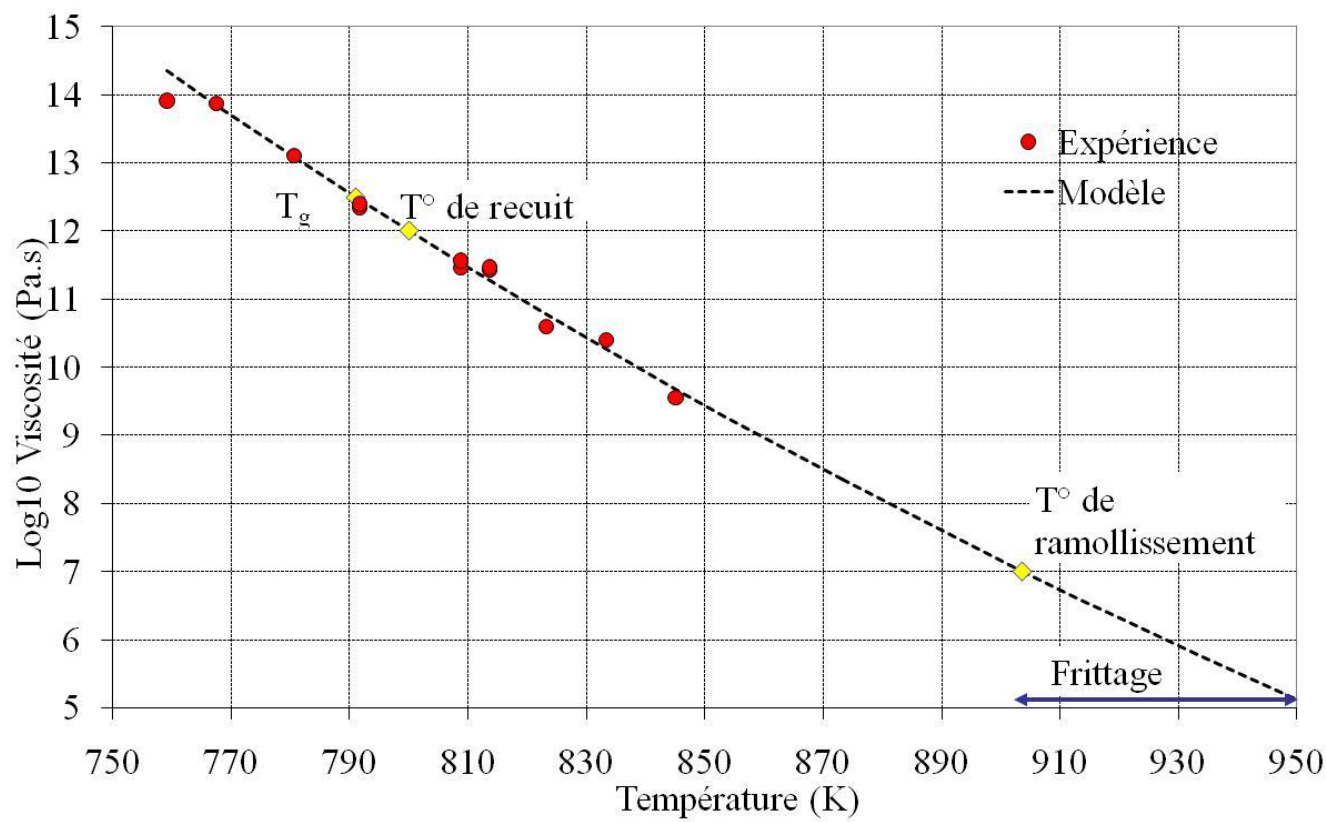
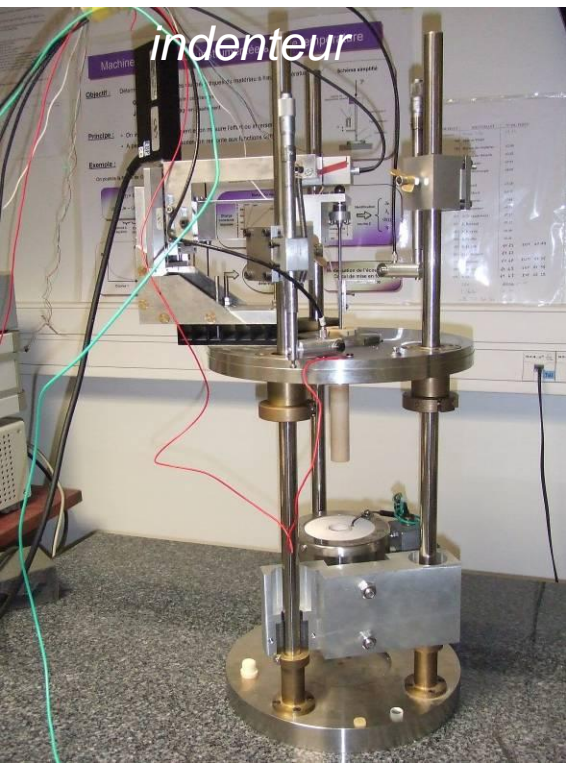
Pourquoi la vitrification?

- Le verre est une bonne matrice de confinement des déchets nucléaires (verre industriel R7T7).

Pourquoi le frittage ?

- Le verre élaboré par frittage n'oxyde pas la couche oPyC des TRISO, contrairement à la fusion (Abdelouas et al. 2006).
- Le verre obtenu par frittage permet de travailler à relativement basse température (< 700 °C au lieu de 1200 °C).
- De **fortes densités relatives** peuvent aussi être atteintes.

Un paramètre primordial dans le choix des températures : la viscosité



$$J(t) - J_e = \frac{4\sqrt{2}r}{3\gamma_c^{3/2}(1-\nu)P} u^{3/2}$$

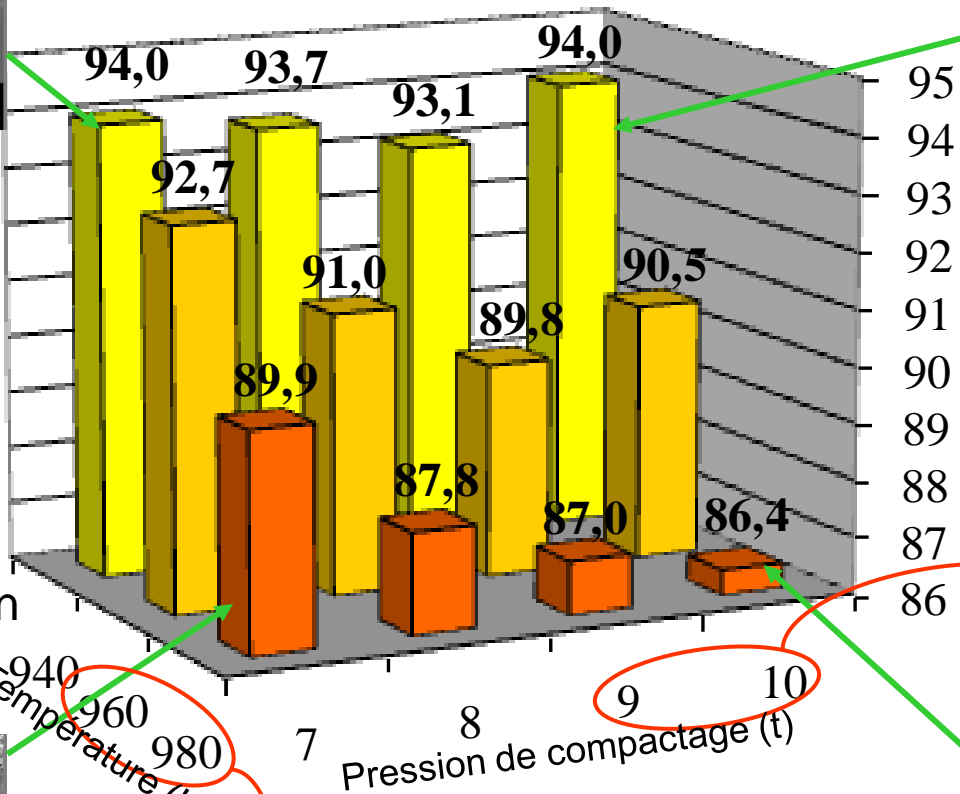
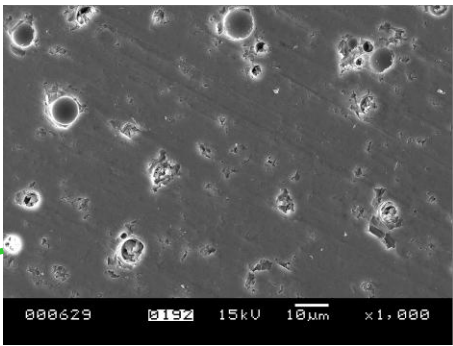
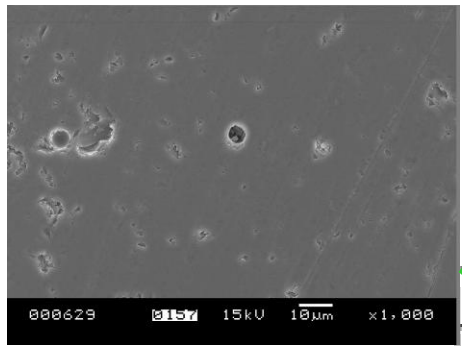
- r : Rayon sphère (m),
- γ_c : Facteur correction = 2,
- ν : Coefficient de Poisson = 0,5,
- P : Charge (N),
- u : Enfoncement (m),
- J_e : Composante élastique de la complaisance

(à T° donnée) puis : $Log_{10} \eta = Log_{10} \frac{1}{\frac{J(t_2) - J(t_1)}{t_2 - t_1}}$

$$\eta(T) = \eta_\infty e^{(\Delta G_a/RT)}$$

Vitrification des particules : OPTIMISATION DU FRITTAGE

Température vs. pression

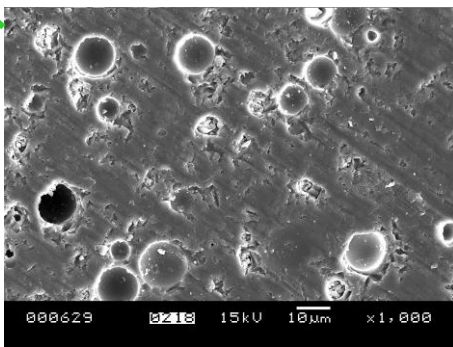
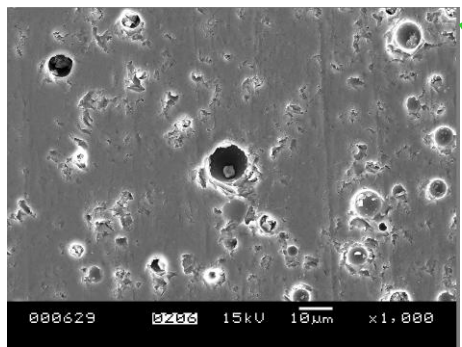


Atmosphère : air
Rampe : 5 K/min
Palier : 3 h
Granulo < 80 µm

A favorisé la diffusion superficielle

Densité relative (%)

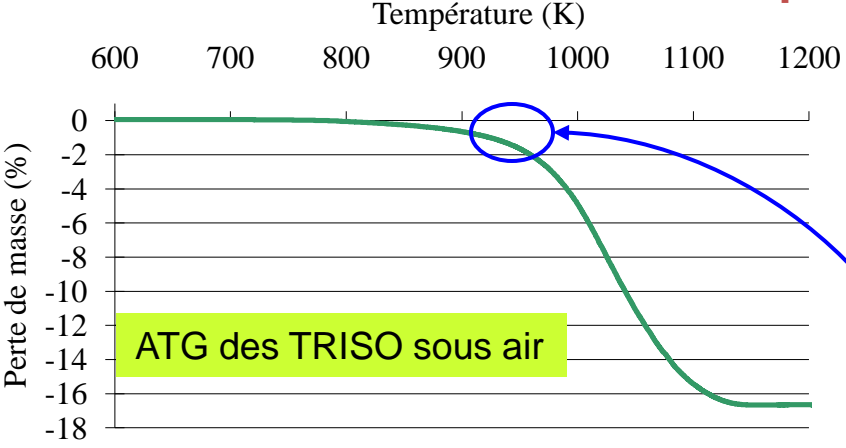
Hautes pressions à proscrire (rupture TRISO)



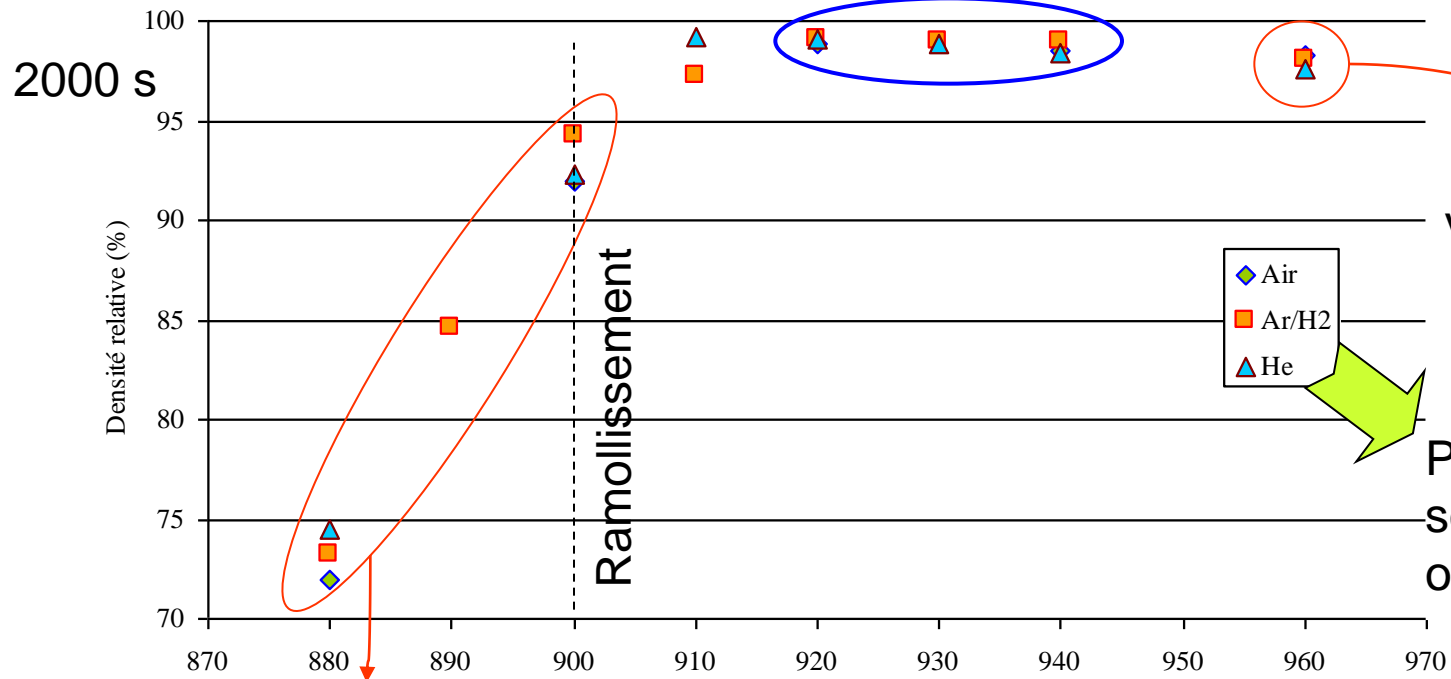
Températures trop élevées

Préchauffer le four

Atmosphère vs. Température



Oxydation de oPyC à l'air dans la gamme de température de frittage → changement d'atmosphère

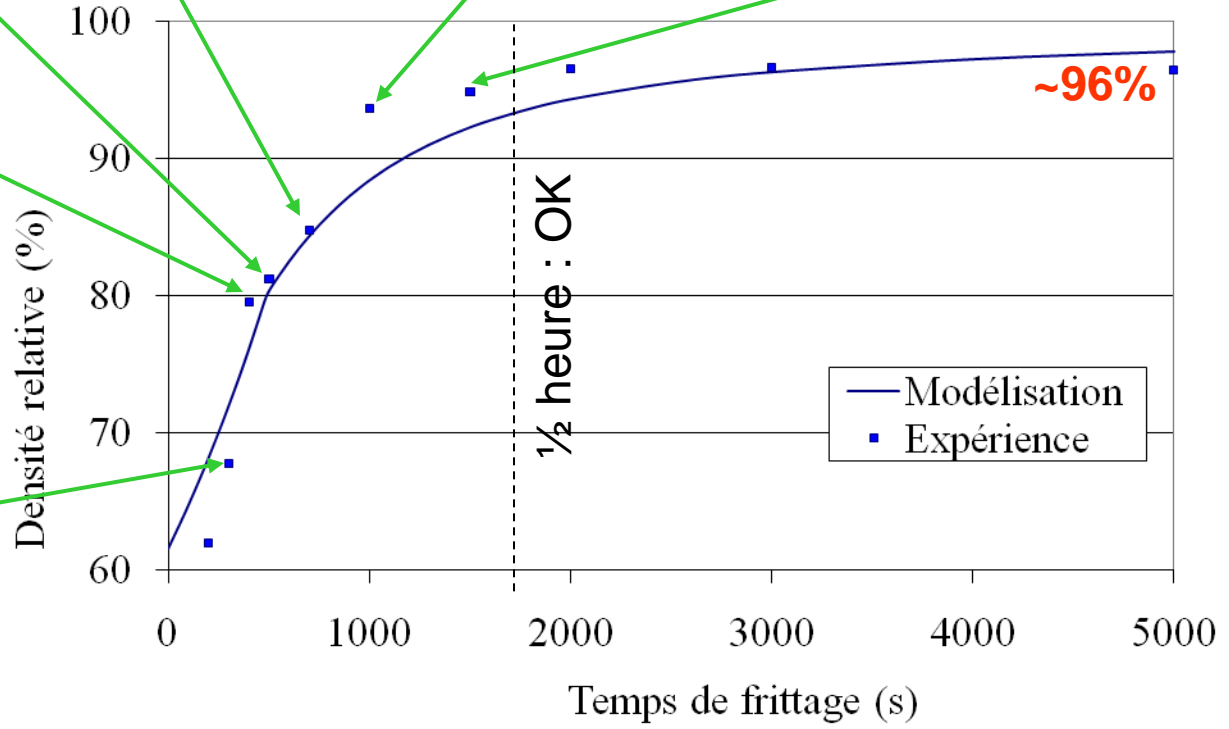
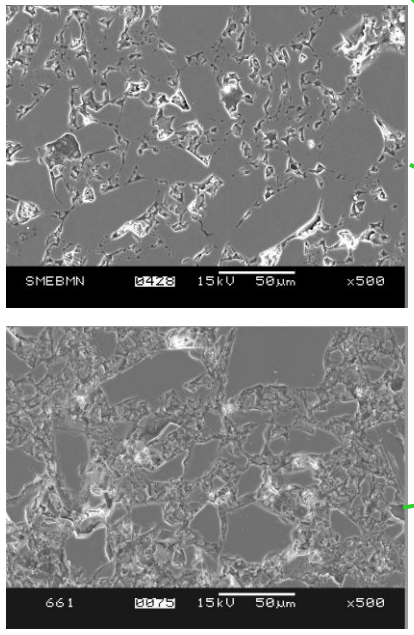
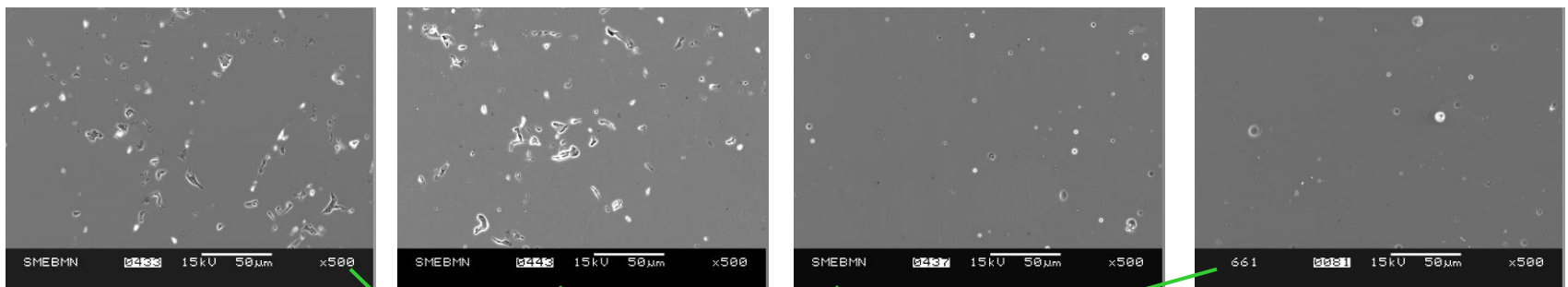


Viscosité trop faible

Pas de problème sous atm. neutre ou réductrice

Cinétique de frittage trop lente

Vitrification des particules : OPTIMISATION DU FRITTAGE



Air
920K

Modèle de Frenkel : Modèle de Mackenzie-Shuttleworth :

Modèle des clusters (Prado) :

$$\rho(t) = \sum_r \left(\frac{\rho_0}{\rho_g \left(1 - \frac{3\gamma t}{8\eta(T)r} \right)^3} \theta(t_{0,8} - t) + \left(1 - \exp \left(\frac{-3\gamma t}{2a_0 \eta(T)r} + \ln \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_g} \right) \right) \right) \theta(t - t_{0,8}) \right) v_r \xi_r$$

Fraction volumique v_r
 Capacité à former des ponts ξ_r

Plan de thèse

- B2** • Séparation graphite / particules TRISO
 - Par jet d'eau haute pression
 - Par traitements thermiques (choc ou combustion)
 - Par ultrasons (faible ou forte intensité)
 - Par voie chimique (conditions sévères ou douces)

- C2** • Séparation kernel / gangue

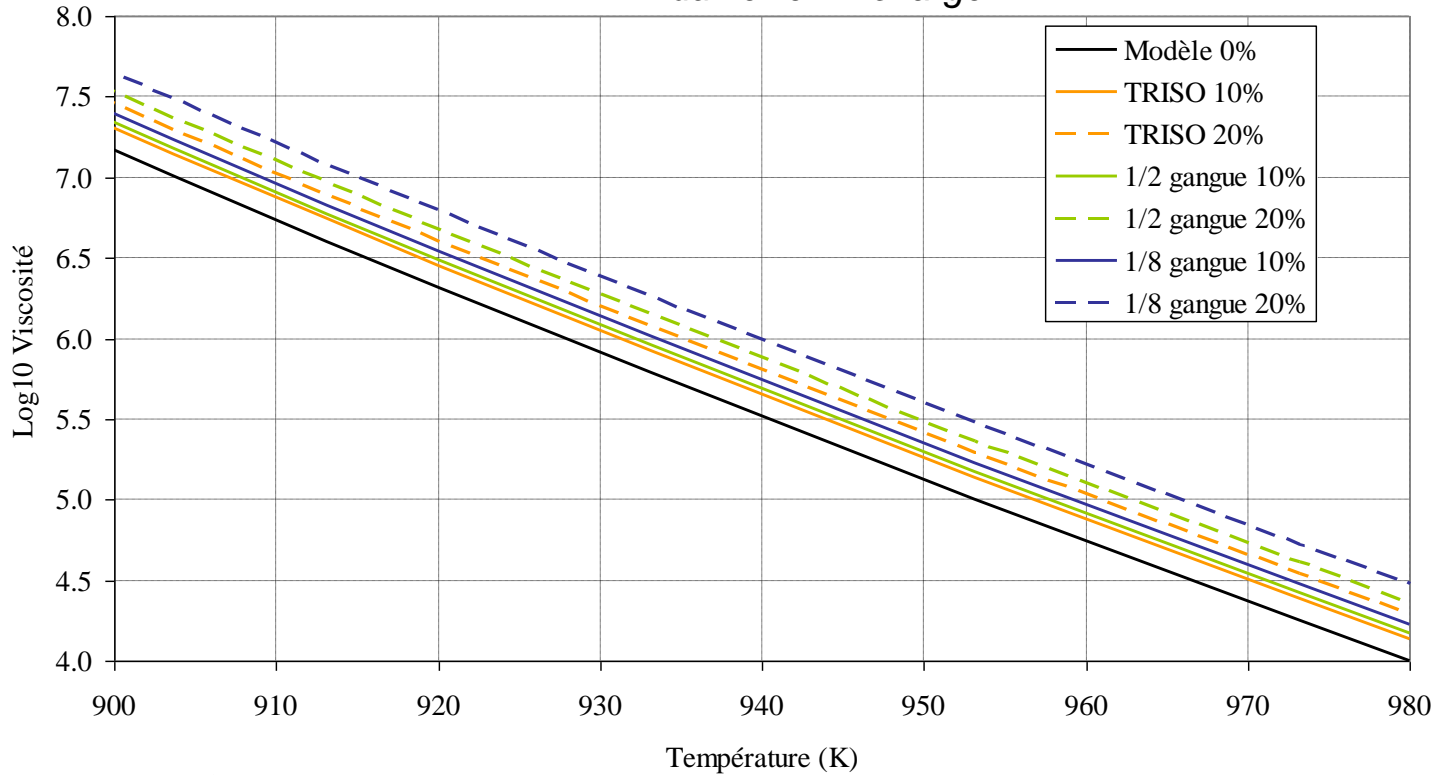
- C1/D** • **Vitrification des particules TRISO**
 - Optimisation du frittage sans particule
 - Incorporation des particules (gangues / TRISO)
- Lixiviation des composites verre + TRISO
- Conclusions / Perspectives

Effet des inclusions sur la viscosité

Modèle de Boccaccini et Ondracek : $\eta = \eta_0 (1 - f)^m$

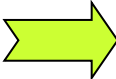
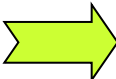
Viscosité du verre taux de charge

- 3 pour les sphères
- 3,75 pour des demi-gangues
- 4,92 pour des 8^{èmes} de gangues

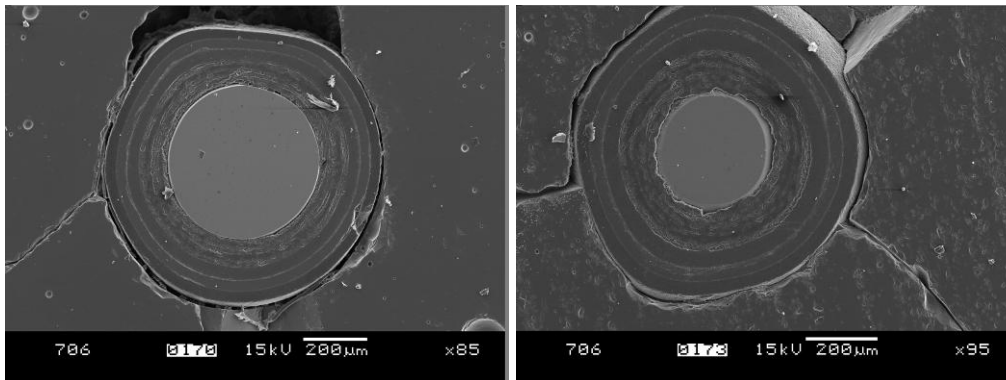
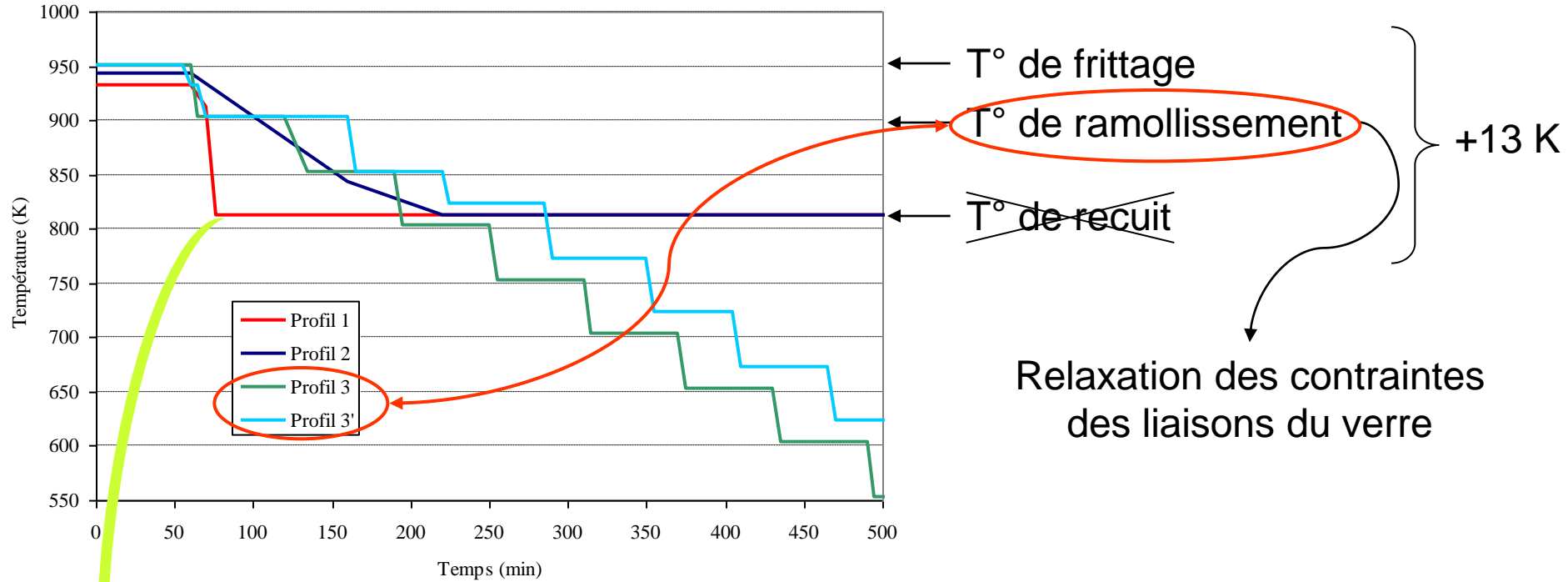


Pour garder la même viscosité : augmenter la température (de 8 à 13 K pour 20 %)

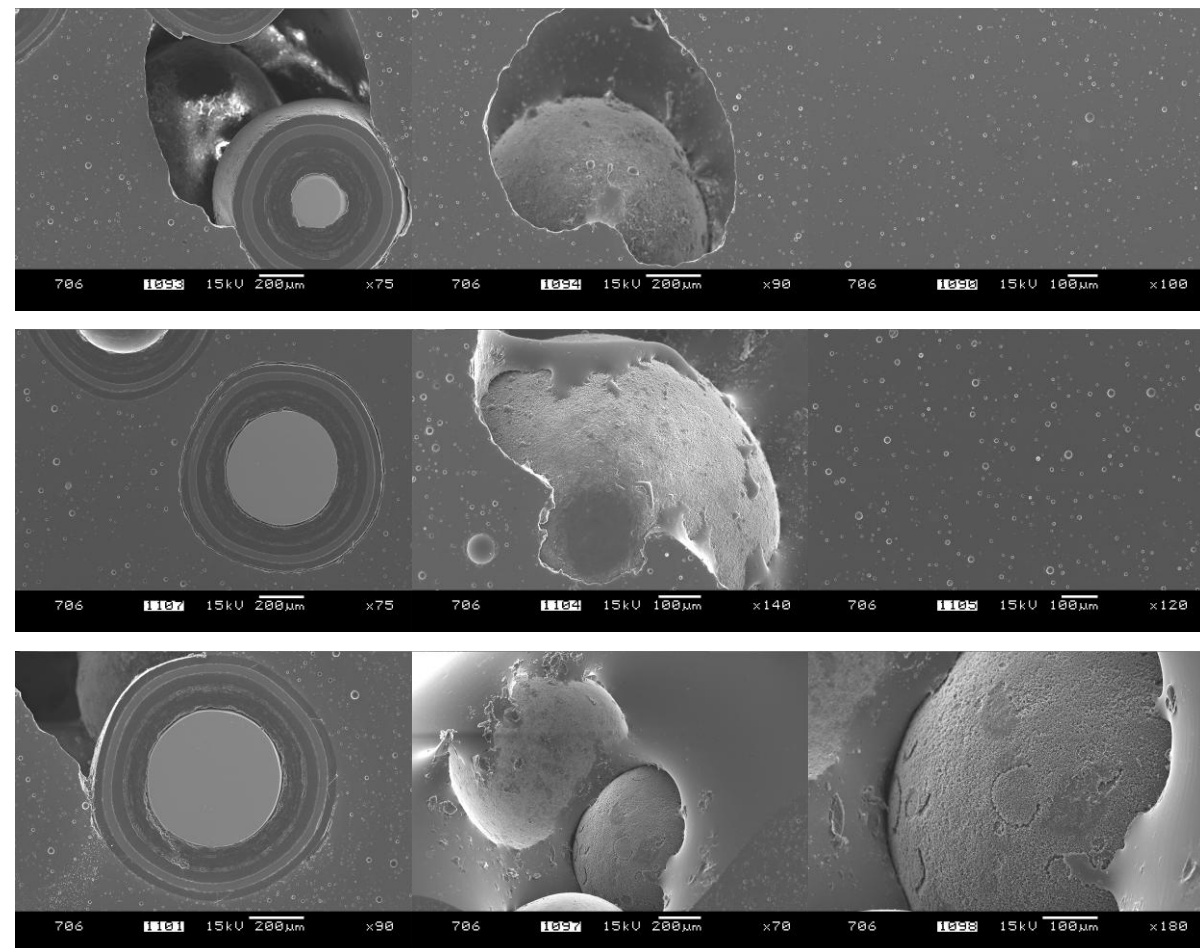
Des défis à relever

- La présence de grosses inclusions génèrent des tensions internes dans le verre pendant le refroidissement.
 Contrôle précis du refroidissement.
- La pression de rupture des particules est d'environ 320 MPa.
 Diminuer la pression de compactage avec le taux.
- Le verre ne mouille pas les particules et les fait flotter (d'autant plus à haute température et palier long).
- Effet de non-frittage des inclusions → diminution densité

Profils de refroidissement



Vitrification des particules : INCORPORATION DES TRISO



%Vol. en
particules

7,9%

11,3%

14,6%

20,4%

25,4%

Avec profils 3 et 3',
aucune fissure :

⊕ faible porosité
dans la matrice

⊕ taux de charge
élevé (+25%)

⊖ cavités autour des
particules (effet de
non-frittage des
inclusions)

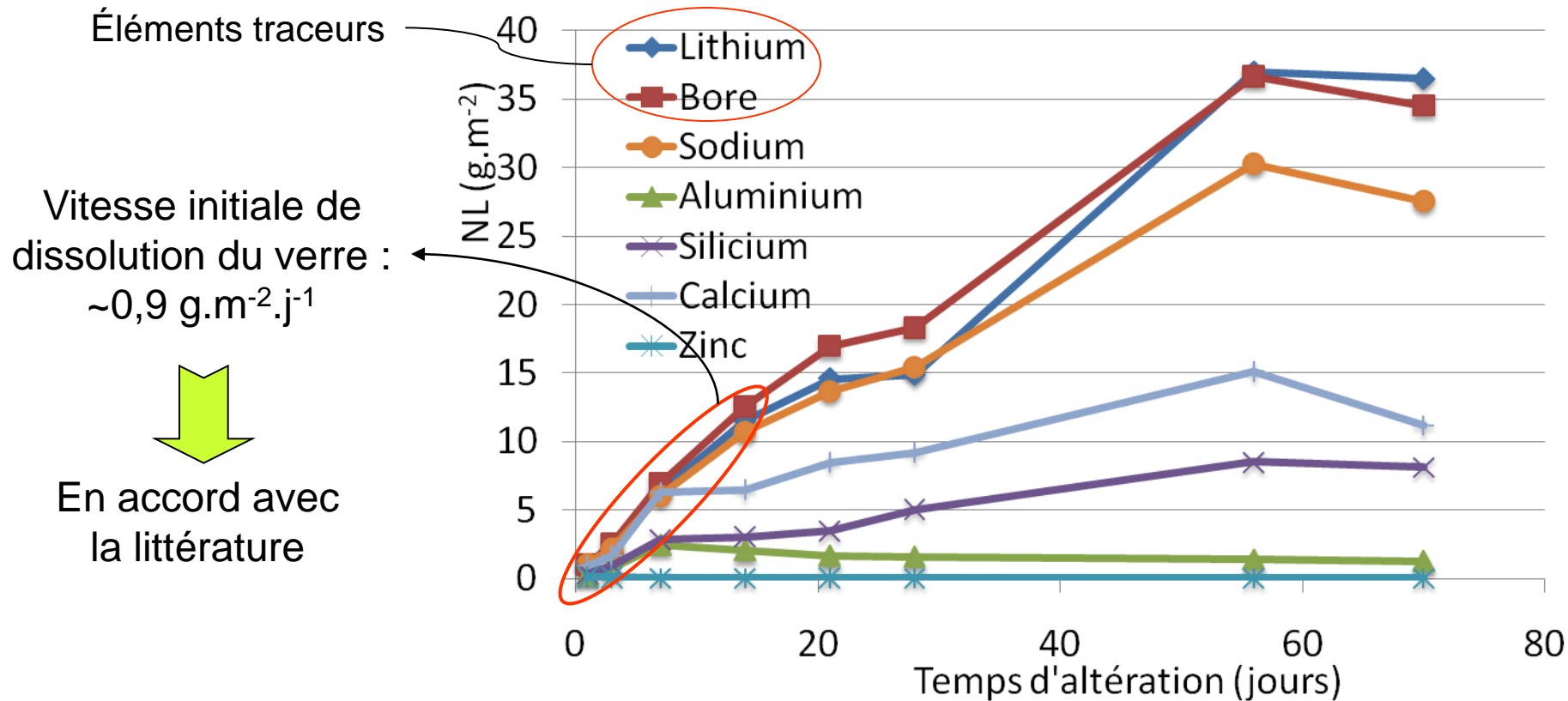


Bonne tenue mécanique des pastilles
($E \sim 65$ GPa et $H_V \sim 760$)

et bonne immobilisation des particules

Test d'altération du verre : Lixiviation statique dans l'eau UP à 90 °C

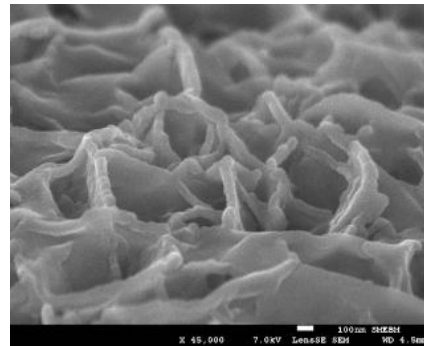
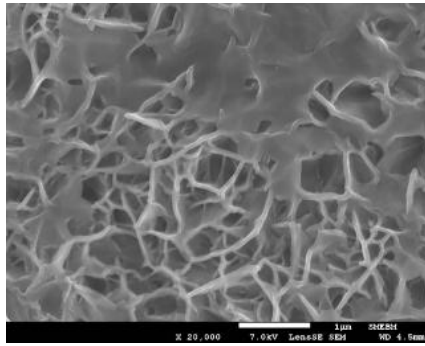
- Pastilles contenant 20% de TRISO à l'uranium
- Une pastille par prélèvement à t = 1 ; 3 ; 7 ; 14 ; 21 ; 28 ; 56 ; 70 jours



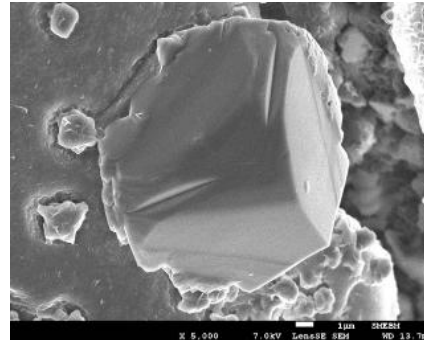
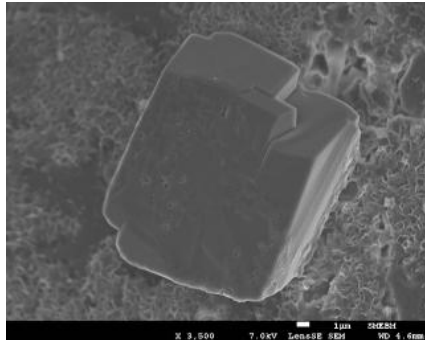
Ralentissement de la vitesse de dissolution
→ précipitation de phases secondaires

Précipitation de phases secondaires

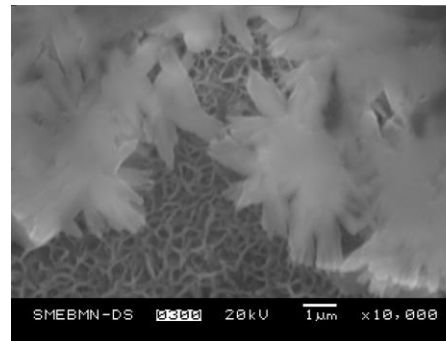
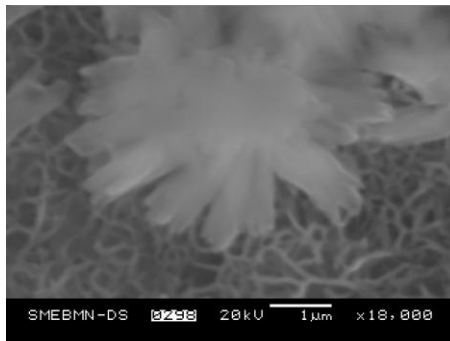
Phyllosilicates
omniprésents :



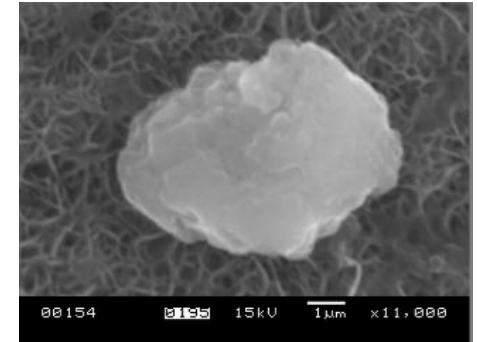
Phases riches
en calcium :



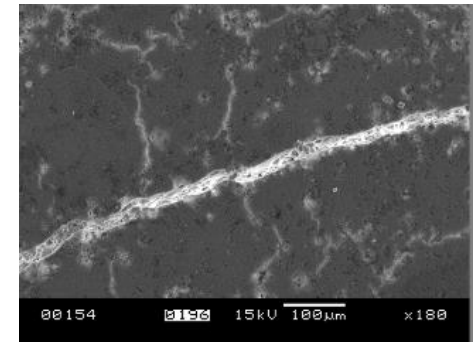
Phases plus
denses (enrichies
en Ca, Zn, Zr) :



Phases riches
en aluminium :

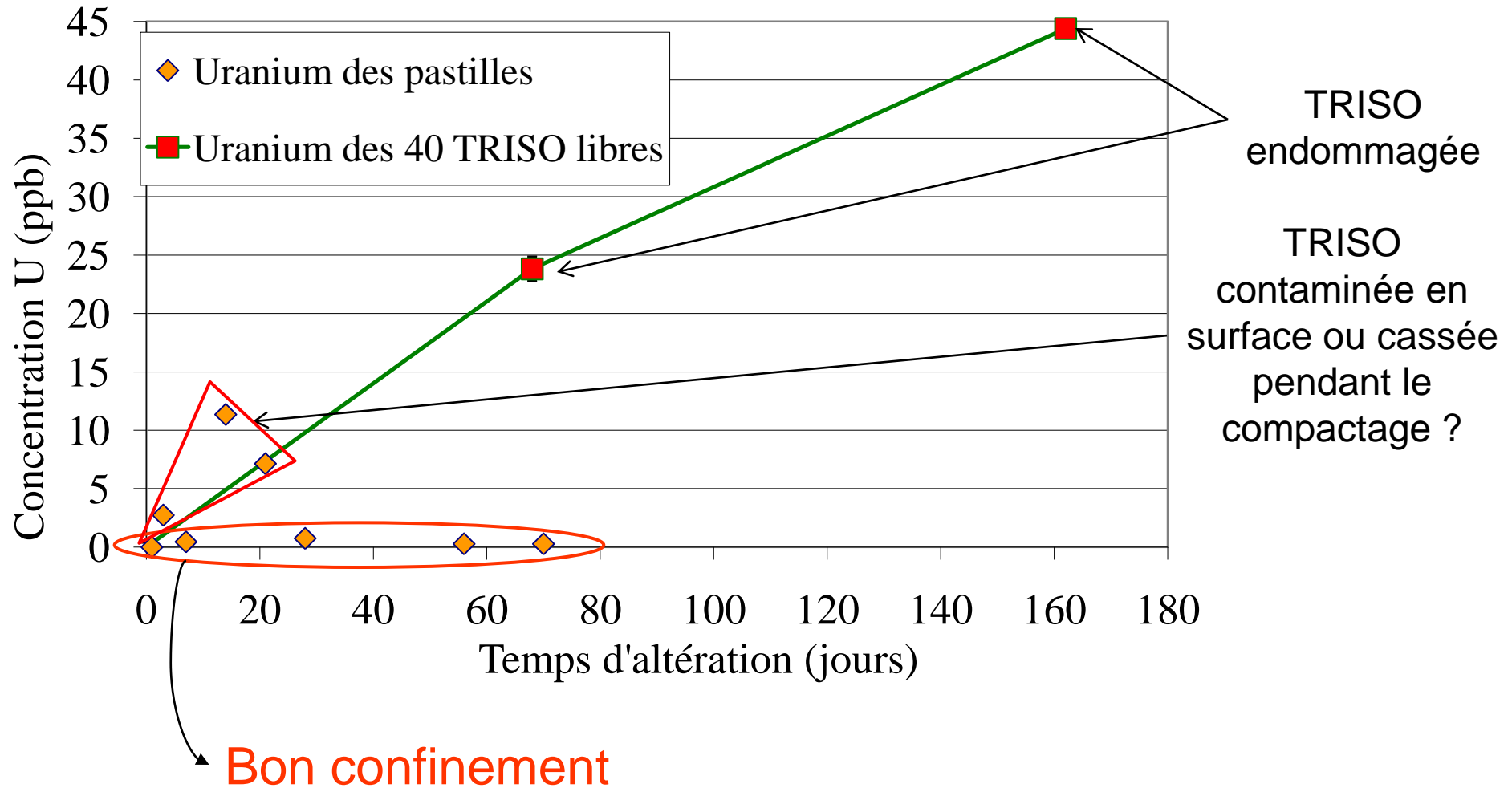


Rebouchage
des fissures :



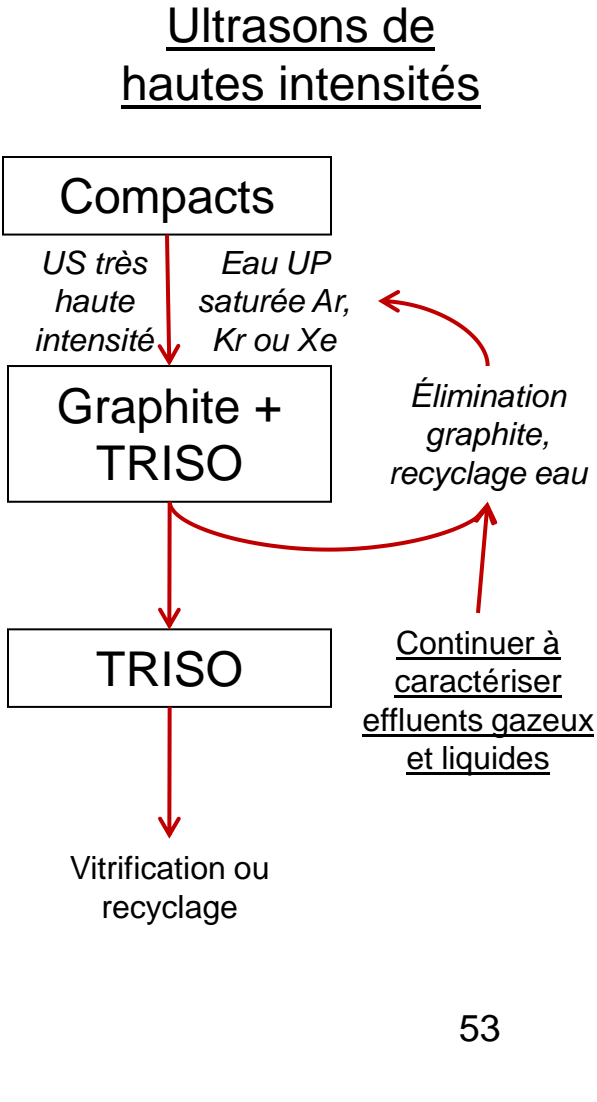
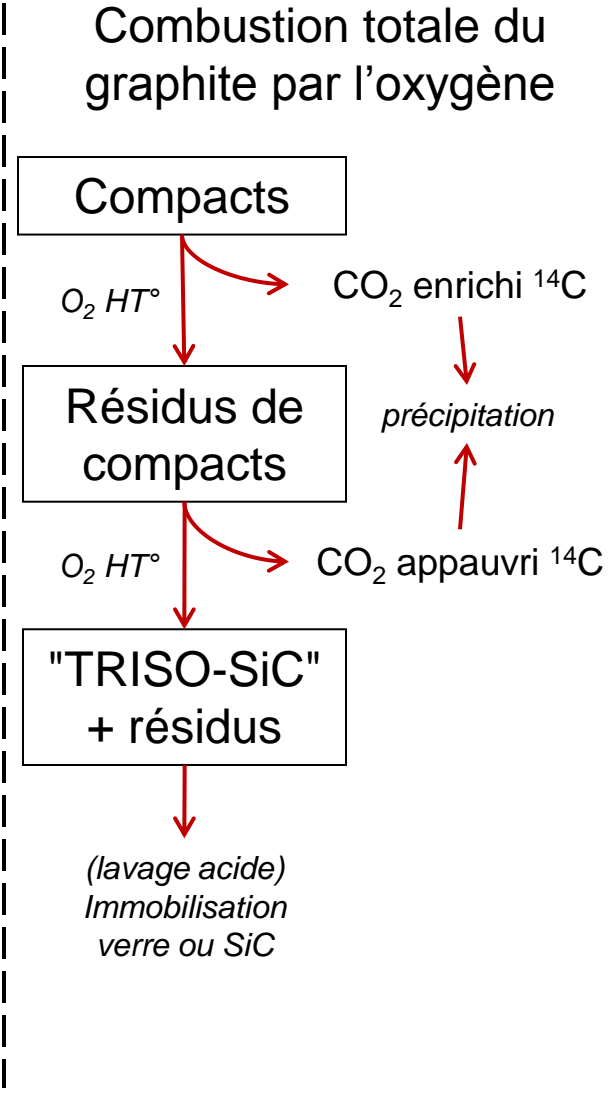
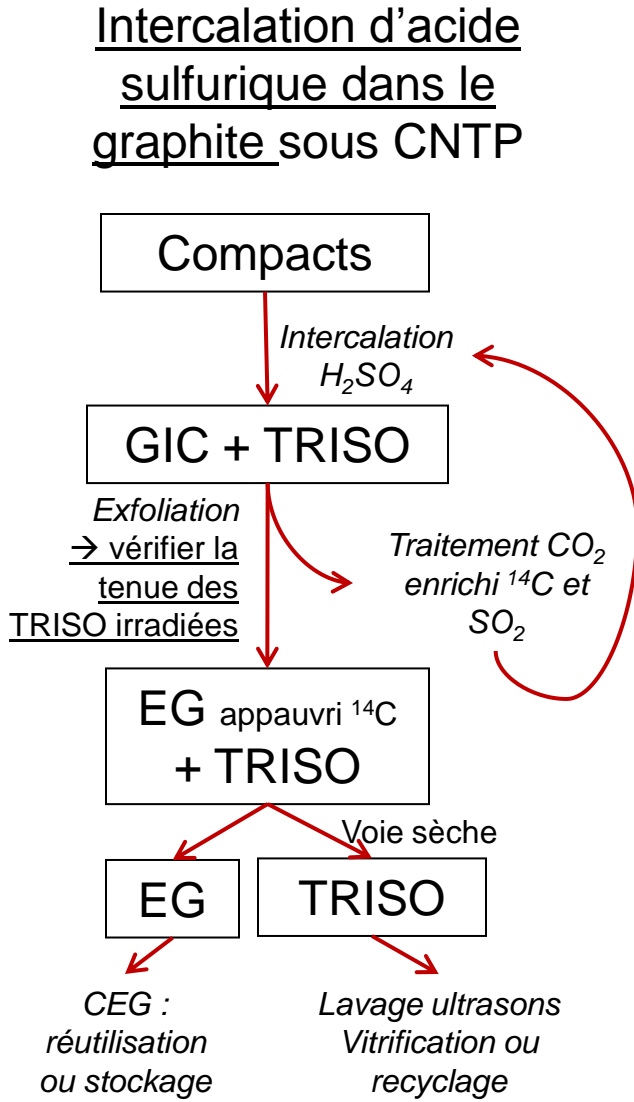
→ réparation
naturelle (cf. Gin)

Relâchement en uranium

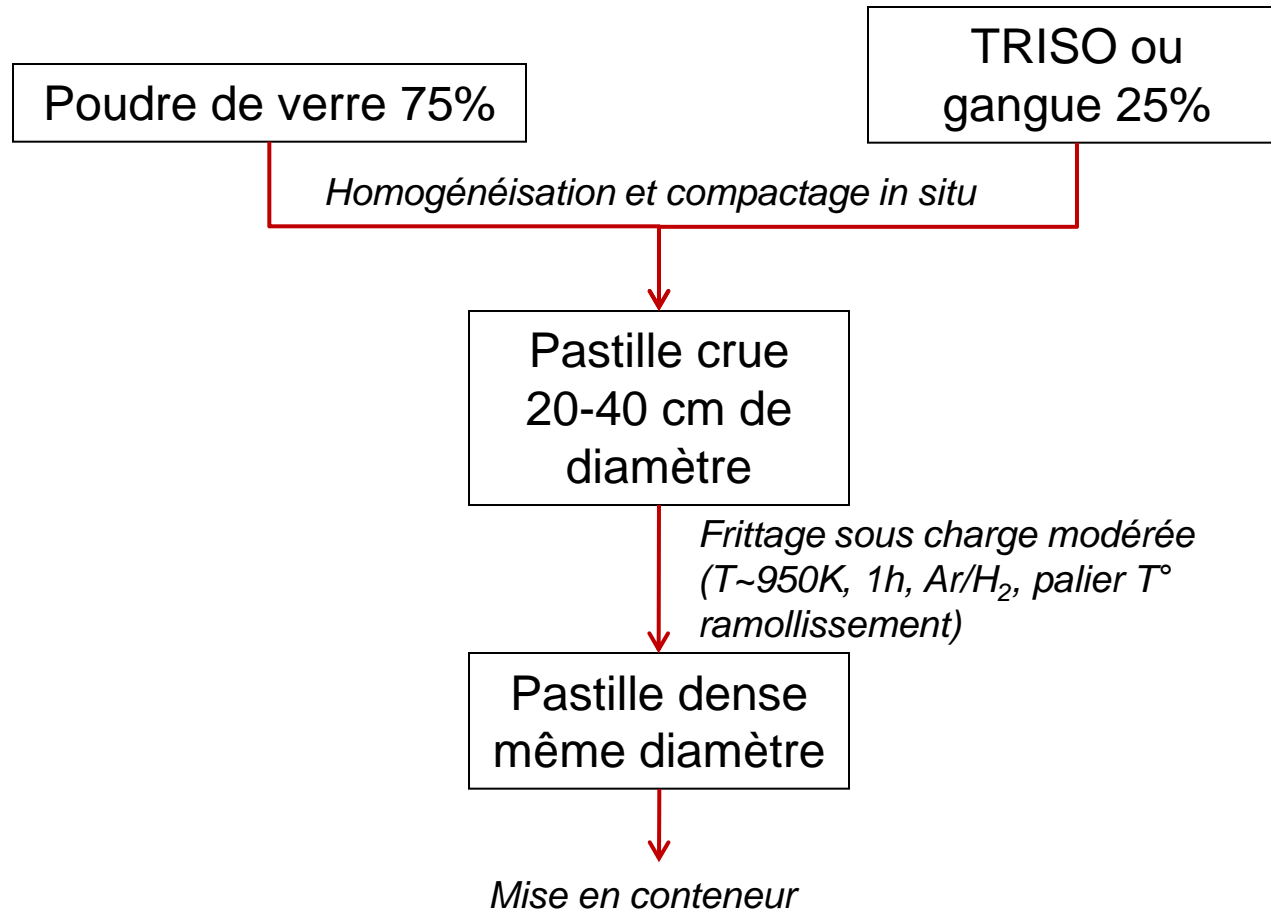


Séparation TRISO / graphite :

les méthodes les plus efficaces sont :



Vitrification des TRISO :



Et je remercie...



A. Abdelouas et B. Grambow (confiance et encadrement), C. Landesman, M. Mokili, M. Fattahi, T. Suzuki, M. Dialinas et G. Blain (discussions), J. Vandendorre (irradiations CERI), K. Perrigaud et S. Azdani (ICP-MS), V. Baty (CI), S. Huclier (MS), C. Bailly (aide), M. Demoly (commandes), G. Rousseau et E. Pleiber (analyses et matériels), service mécanique (usinage), S. Benac (missions)...



pour le financement, F. Poncelet et M.-H. Mouliney (projet), F. Cellier (fourniture des compacts), D. Grenèche et D. Hittner (discussions),



A. Barreau et N. Stéphent (MEB), E. Gautron (MET), S. Grolleau (granulométrie laser et ATG),



J.-C. Sangleboeuf, E. Robin, Y. Guéguen, V. Burgaud et V. Chean (essais mécaniques),




E. Chevrel (porosimétrie Hg, BET),




S. Nikitenko (ultrasons), C. Mayant (altération verre),



F. Monteau (APCI), L. Le Thuaut (SPME), 



Y. Godefert (jet d'eau), pupitreurs 

... et tous ceux que j'oublie