

Transitions énergétiques : enjeux, verrous, défis

Colloque de lancement du Laboratoire Inspirons Demain sur l'énergie

Les solutions à l'étude pour l'énergie nucléaire de demain

Murielle Rivenet, Franck Beclin, Ingrid Proriot Serre

☐ Panorama des forces en action à Lille

Approche expérimentale

- Chimie et étude thermodynamique des combustibles nucléaires
- Piégeage des radionucléides
- Chimie, physico-chimie, physique et mécanique des matériaux
- Etude de la durabilité des installations de stockage des déchets

Approche théorique

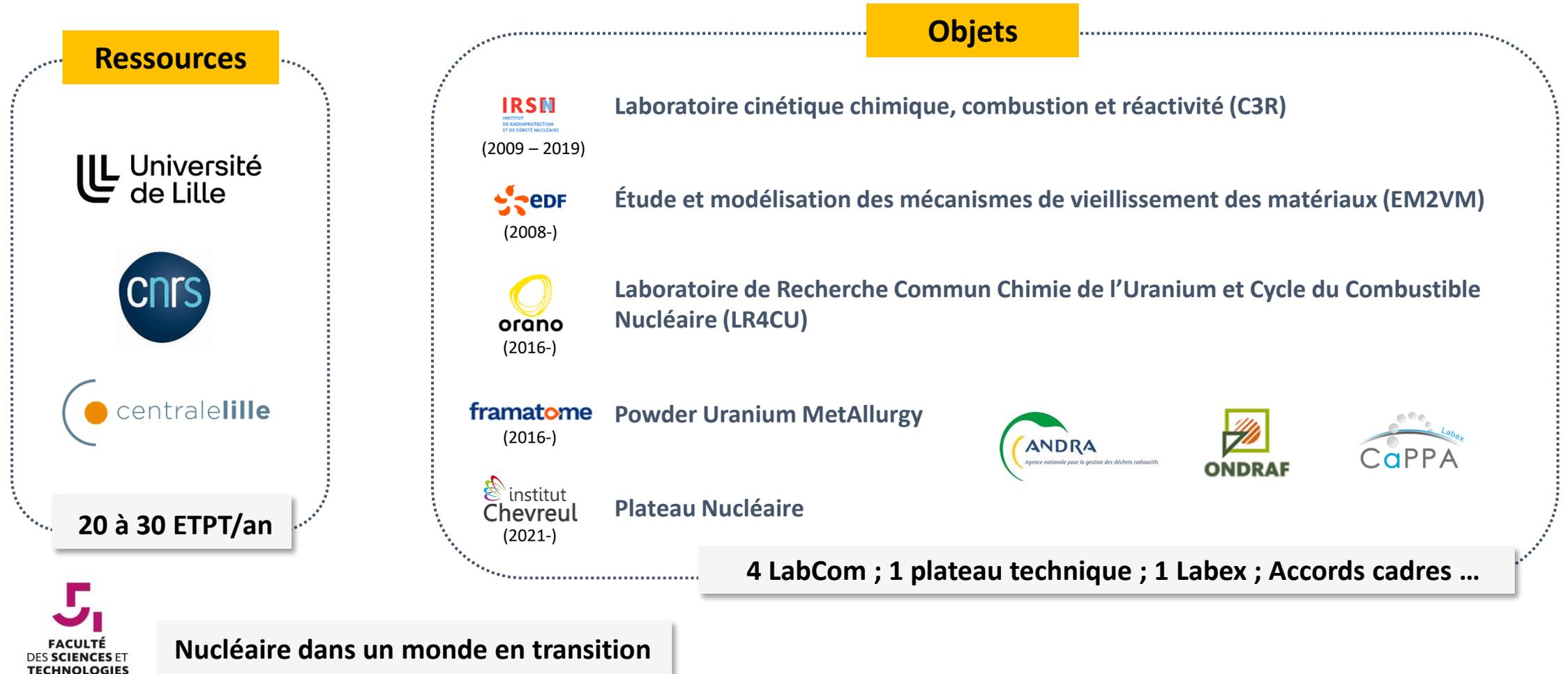
- Simulation multi-échelle du comportement des matériaux de structure sous irradiation
- Modélisation mathématique et numérique de problèmes de corrosion
- Développement et application de codes de simulation pour la prise en compte des effets de la relativité

APPLICATIONS

- **Purification, fabrication et recyclage du combustible nucléaire**
- **Durabilité des matériaux (métaux, verres, bétons, argiles)**
- **Migration et réactivité des radionucléides ou des gaz (H₂)**
- **Sureté des installations**



☐ Panorama des forces en action à Lille



❑ Origine de l'énergie nucléaire

Protactinium : ${}_{91}^{230}\text{Pa}$

Thorium : ${}_{90}^{227}\text{Th}$

Uranium : ${}_{92}^{231}\text{U}$ ${}_{92}^{232}\text{U}$ ${}_{92}^{233}\text{U}$ ${}_{92}^{235}\text{U}$

Neptunium : ${}_{93}^{236m}\text{Np}$ ${}_{93}^{236}\text{Np}$

Plutonium : ${}_{94}^{236}\text{Pu}$ ${}_{94}^{237}\text{Pu}$ ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ ${}_{94}^{241}\text{Pu}$ ${}_{94}^{243}\text{Pu}$

Américium : ${}_{95}^{241}\text{Am}$ ${}_{95}^{242m}\text{Am}$ ${}_{95}^{242}\text{Am}$ ${}_{95}^{244}\text{Am}$

Curium : ${}_{96}^{242}\text{Cm}$ ${}_{96}^{243}\text{Cm}$ ${}_{96}^{245}\text{Cm}$ ${}_{96}^{247}\text{Cm}$

Californium : ${}_{97}^{249}\text{Cf}$ ${}_{97}^{251}\text{Cf}$ Isotopes utilisés dans les filières industrielles

Caractère fissile des isotopes de certains éléments chimiques

${}_{92}^{235}\text{U}$ = Isotope fissile existant à l'état naturel

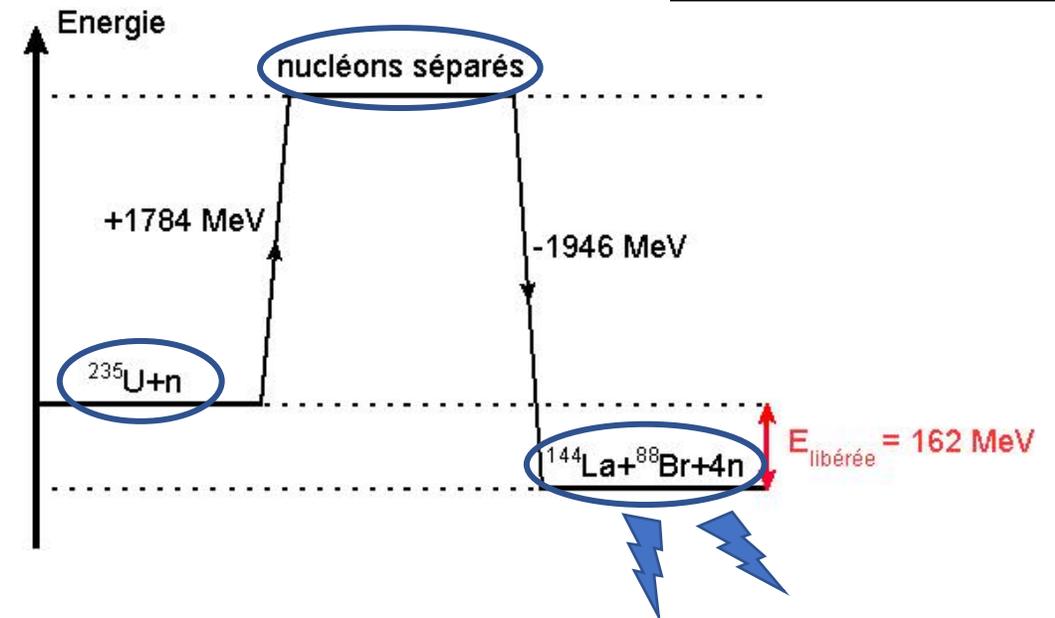
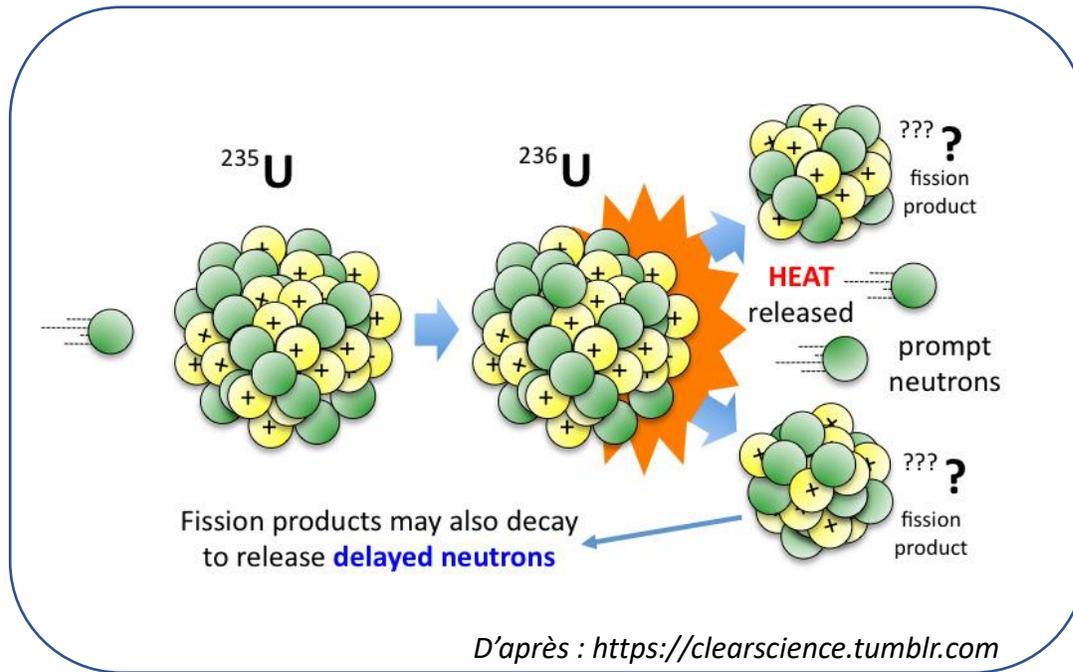
${}_{92}^{233}\text{U}$ = Isotope produit dans les réacteurs au thorium

Isotopes du plutonium produits à partir de l'uranium et récupérés par traitement du combustible nucléaire utilisé.

Les autres isotopes ne sont pas utilisables industriellement soit parce qu'ils sont produits en quantité insuffisante soit parce que leur temps de vie est trop court.

${}_{92}^{235}\text{U}$ = élément à la base des combustibles nucléaires

❑ Fission du noyau d'un atome d'uranium

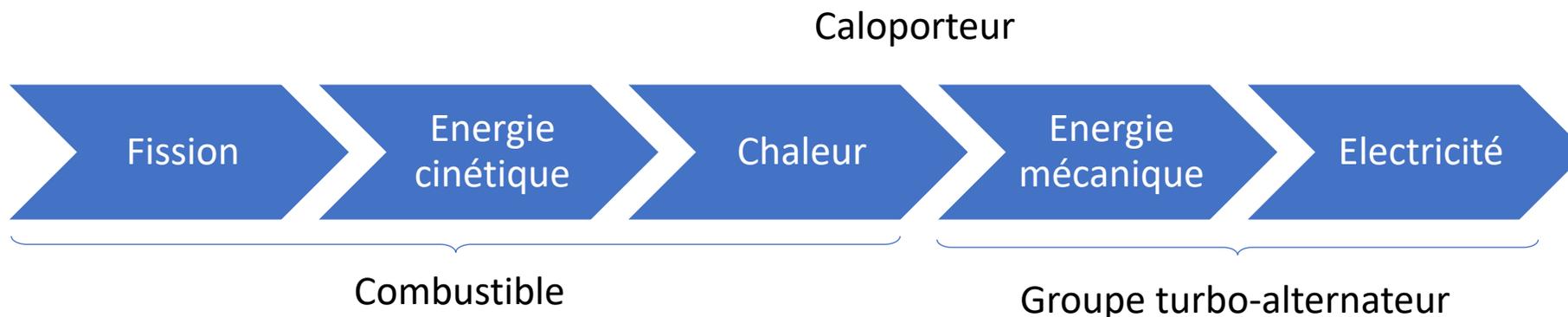


$E_l ^{235}\text{U} = 7,591 \text{ MeV}$
 $E_l ^{144}\text{La} = 8,282 \text{ MeV}$
 $E_l ^{88}\text{Br} = 8,564 \text{ MeV}$

Au final, la fission du noyau d'un atome d'uranium libère une énergie totale de l'ordre de **200 MeV**.

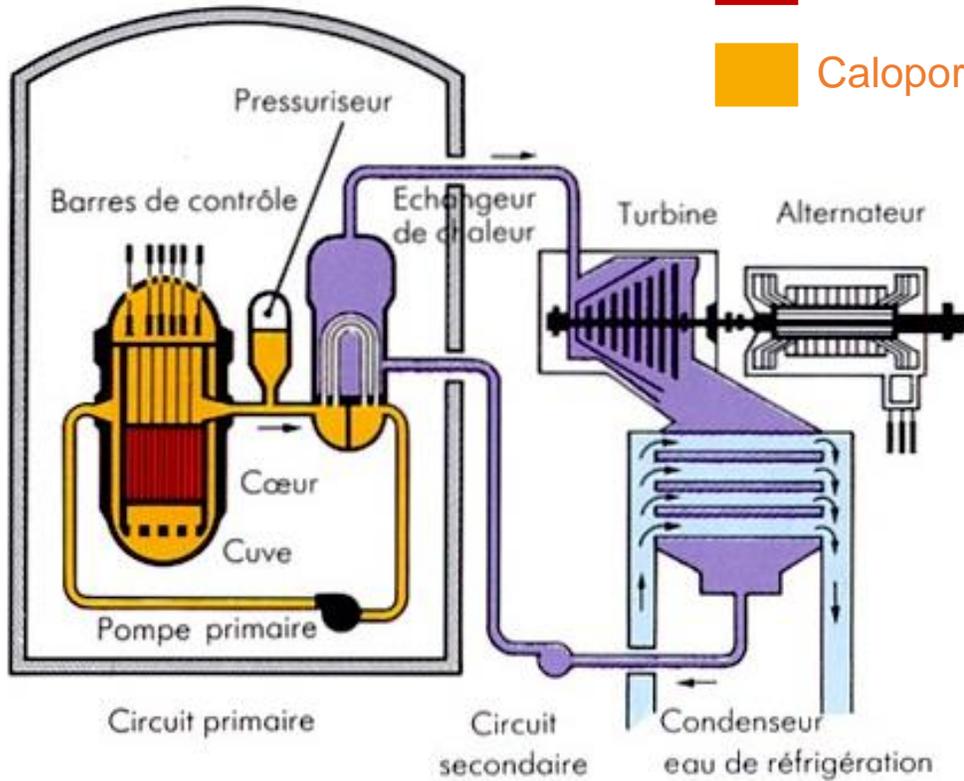
□ Production d'électricité à partir de l'énergie libérée par la fission

- Ejectés avec une vitesse de l'ordre de **8 000 km/s**, les **produits de fission** se frayent un chemin parmi les autres atomes en les « bousculant ».
- Lors de ces chocs, ils **perdent rapidement de la vitesse** (et donc de l'**énergie cinétique**) en **échauffant la matière** environnante, puis ils s'arrêtent dans la masse d'uranium.
- L'énergie cinétique de départ se trouve finalement transformée en **chaleur** : localement, la température de l'uranium augmente.
- Dans un réacteur nucléaire électrogène, la chaleur est récupérée sous forme d'**énergie mécanique** pour produire de l'électricité.

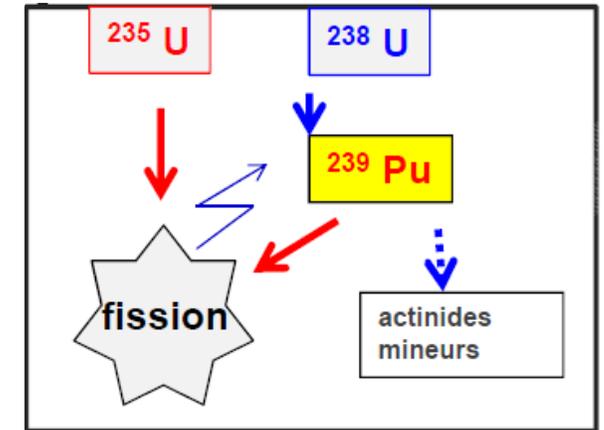


Technologie des réacteurs à eau pressurisée (REP)

- Combustible à base d'uranium
- Caloporteur = eau (155 atm, T= 320° C)



Réactions au sein du combustible

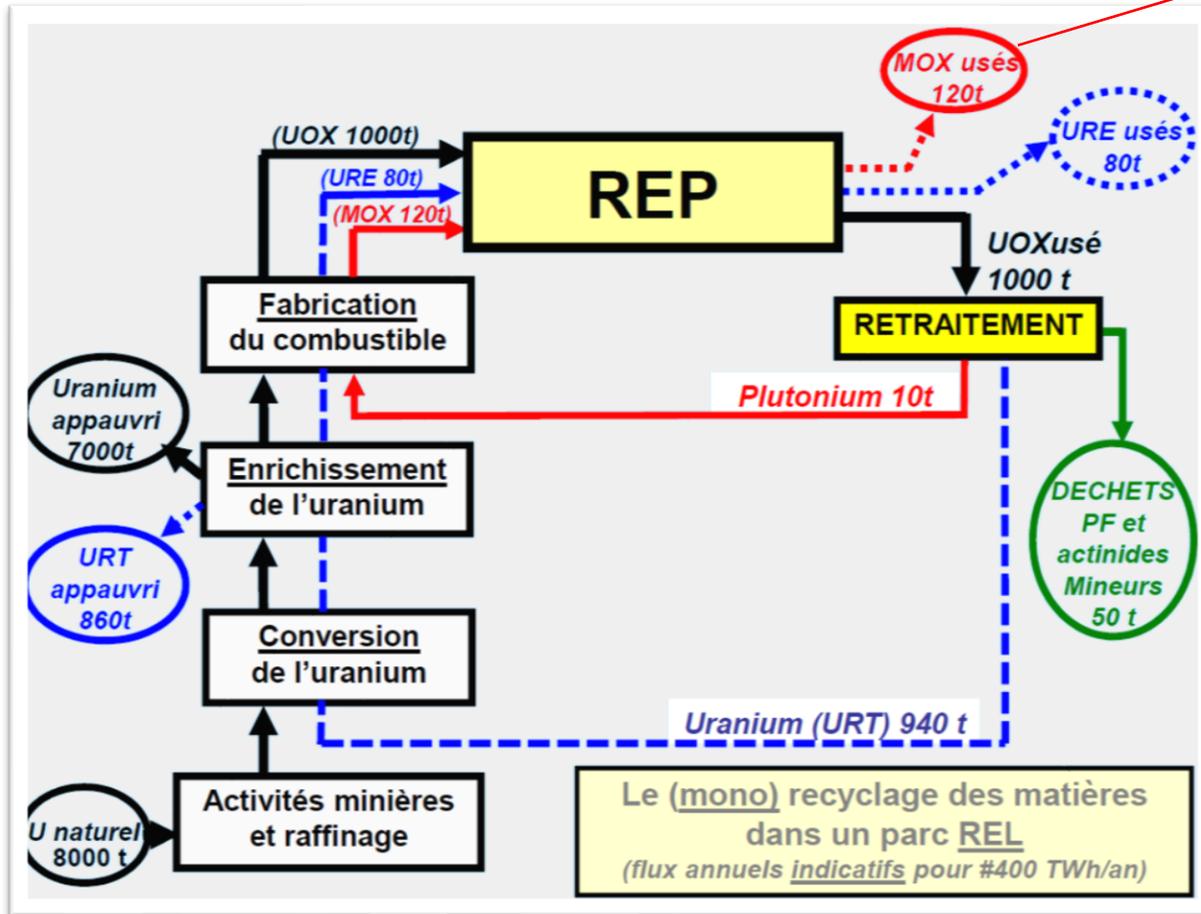


Composition combustible utilisé

| | | |
|---------------------------------------|---------------------|--------|
| ■ | Uranium | (95%) |
| ■ | Produits de fission | (4%) |
| ■ | Plutonium | (1%) |
| ■ | Actinides mineurs | (0.1%) |

Matières valorisables → TRAITEMENT

Valorisation des matières recyclées



2013 : 1500 tonnes (+120 tonnes/an)
2035 : 4000 tonnes (# 250 t Pu)

Verrous au multirecyclage

Réactivité du plutonium en RNL (2 km/s)



Augmentation teneurs en actinides mineurs

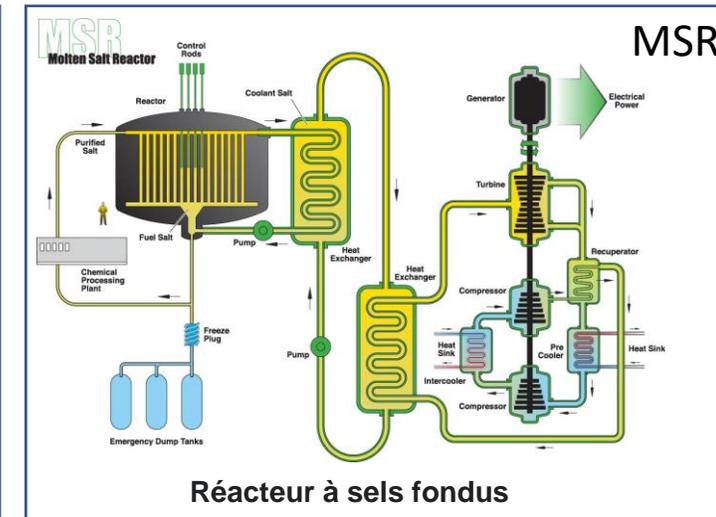
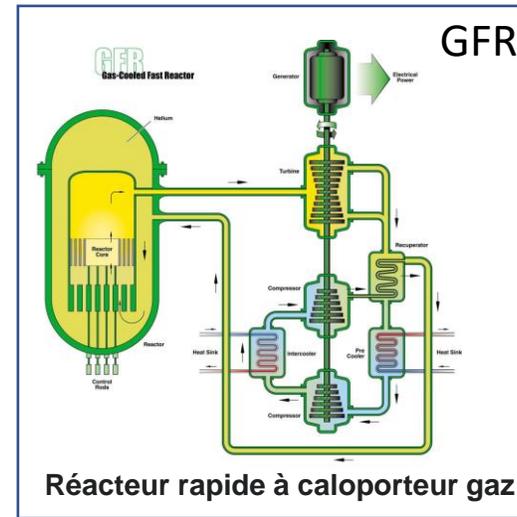
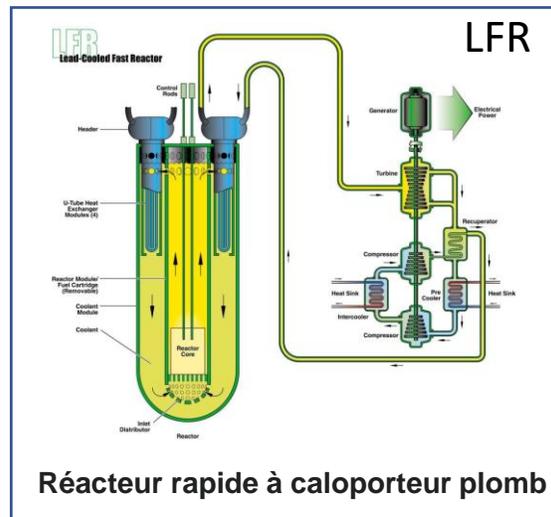
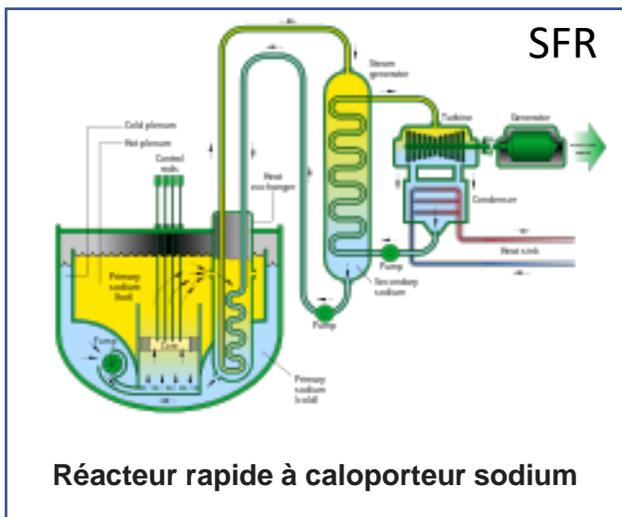
- Enjeux de réactivité nucléaire (fission)
- Enjeux de traitement
 - Radiotoxicité
 - Tps de refroidissement x 10
 - Dimensionnement installations



Réacteurs à neutrons rapides (RNR) (20 000 km/s)

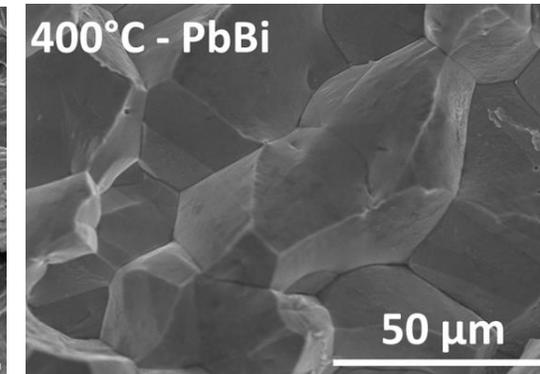
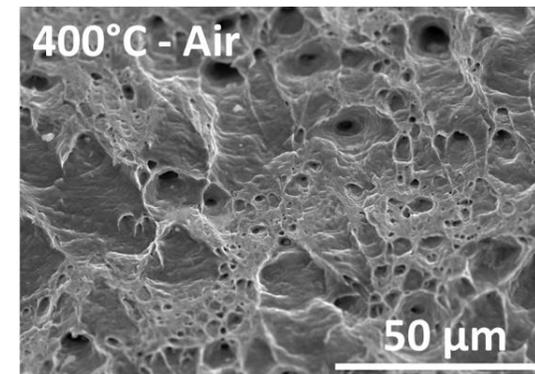
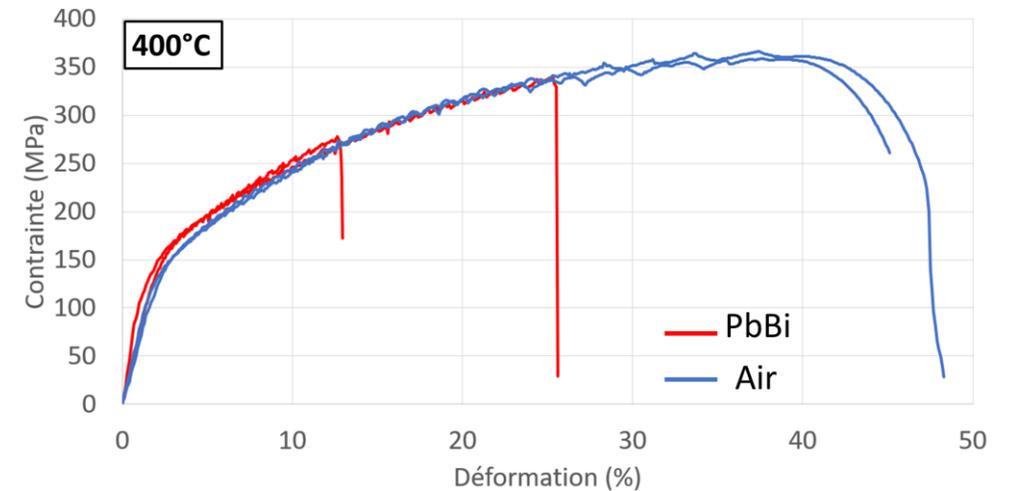
❑ Réacteurs à neutrons rapides adaptés au multirecyclage du plutonium

- Pour que les neutrons soient rapides, ils ne doivent pas être ralentis par un modérateur
 - Impossible d'utiliser l'eau comme caloporteur pour un RNR
 - Métaux liquides, gaz ou sels comme caloporteurs
- Combustibles fonctionnant avec du plutonium



Les programmes de recherche à Lille – Technologies les plus avancées (SFR, LFR)

Comportement d'alliage métalliques en présence de métaux liquides (Na, Pb, Pb-Bi)

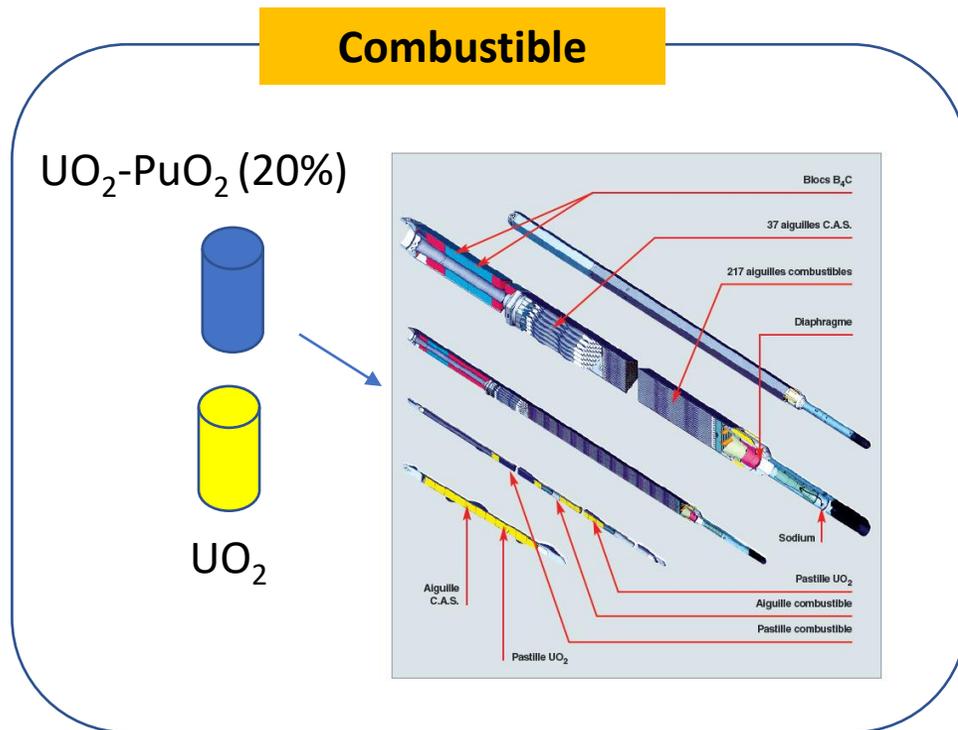


Endommagement d'alliage métallique en présence de métaux liquides

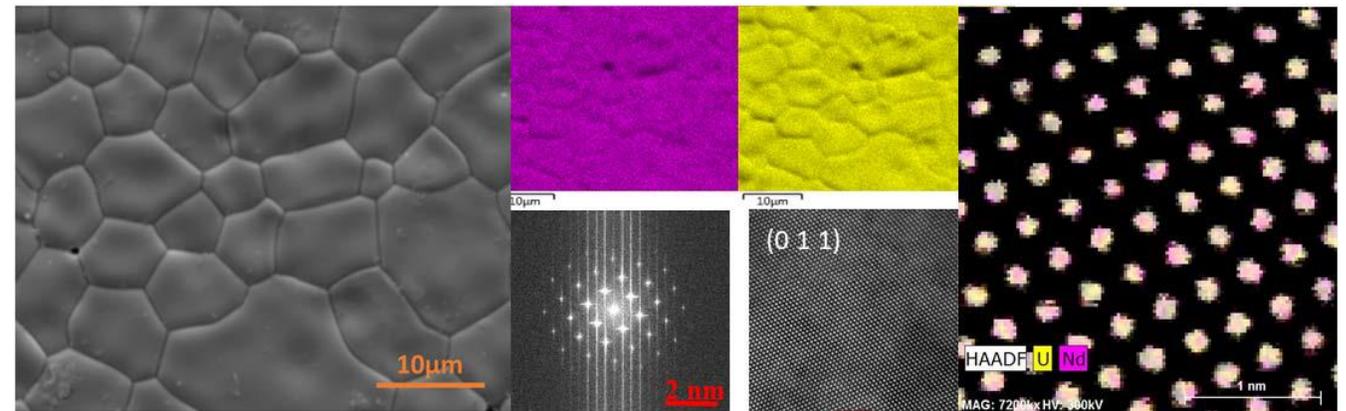
- Compréhension des mécanismes de fragilisation
- Recherche du meilleurs couples alliages métalliques / fluides caloporteurs pour RNR

Les programmes de recherche à Lille – Technologies les plus avancées (SFR, LFR)

Optimisation de la microstructure d'oxydes mixtes

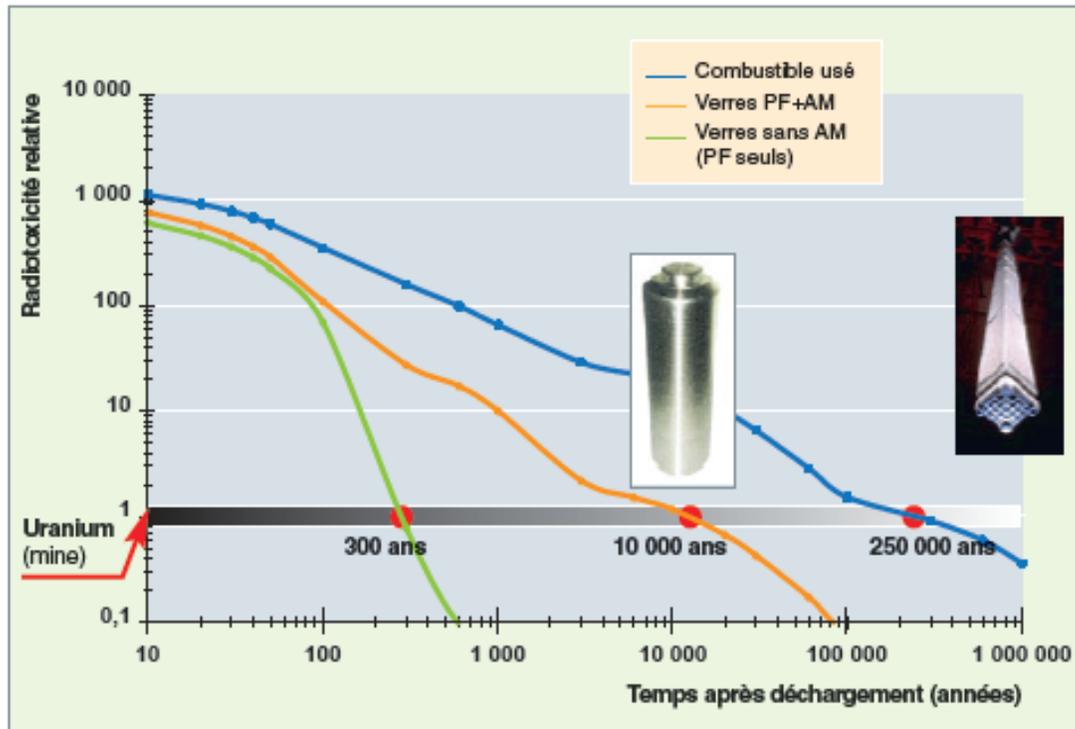


Distribution cationique au sein d'une pastille $(U,Nd)O_{2-x}$, de structure fluorine



- Recherche de voies de synthèse innovantes en systèmes simulant associant Uranium et Lanthanides (Nd, Ce)
- Optimisation du frittage céramique
- Transposition aux systèmes à base de plutonium dans des installations dédiées (ATALANTE, JRC Karlsruhe)

Les programmes de recherche à Lille – Technologies de rupture (MSR)



Diminuer la radiotoxicité des déchets implique de recycler les actinides mineurs en plus du plutonium.

Verrous technologiques liés à la fabrication des combustibles nucléaires pour les SFR dans la perspective d'un recyclage avancé incluant les actinides mineurs.



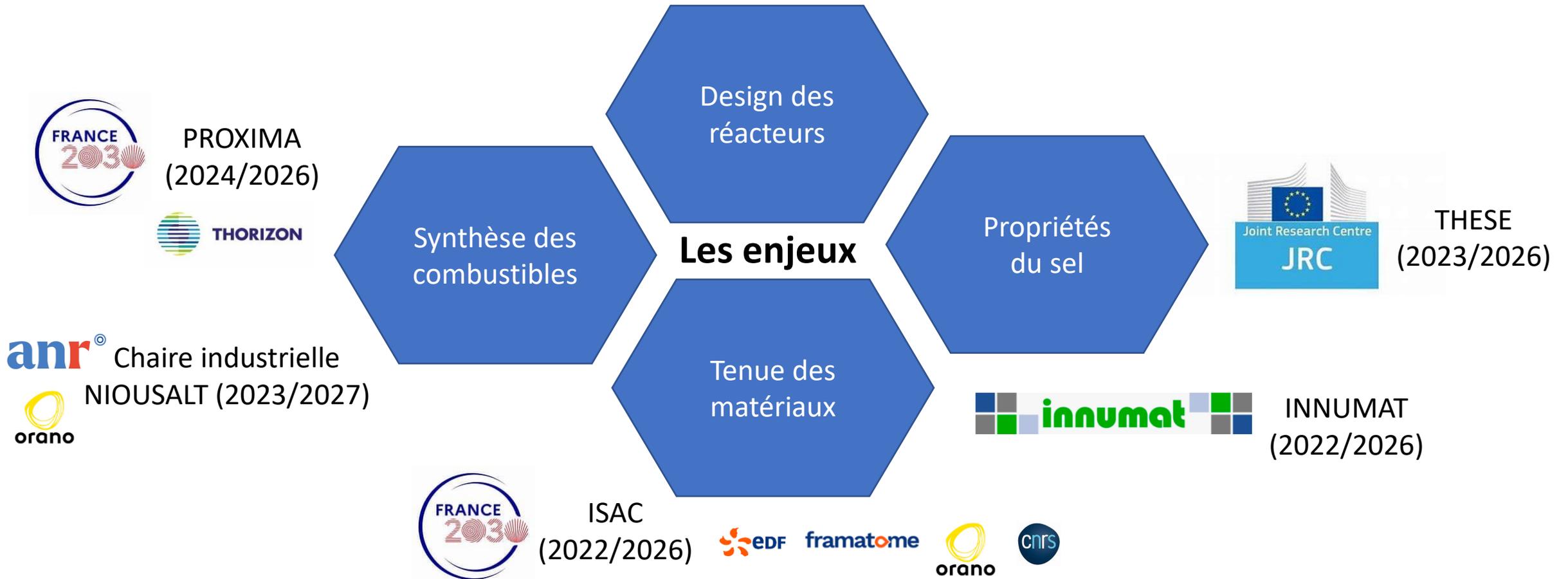
Réacteurs nucléaires à sels fondus

Combustible



Combustible à l'état fondu dans des sels HT = solvant + caloporteur

Les programmes de recherche à Lille – Technologies de rupture (MSR)

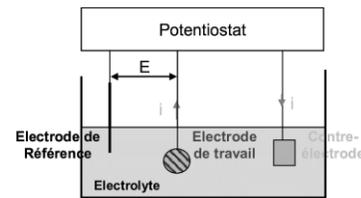


Les programmes de recherche à Lille – Technologies de rupture (MSR)

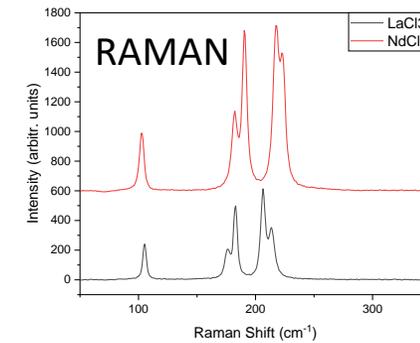
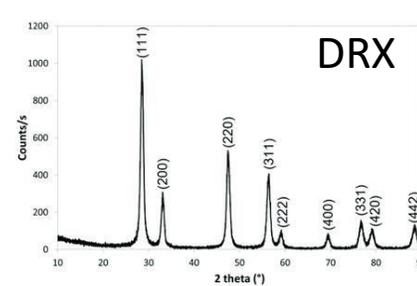
Travail en milieu chlorures fondus

Etude de la réactivité en sels fondus

Synthèse des solides, croissance cristalline



Caractérisation in situ (en développement)



Caractérisation des solides et des métaux

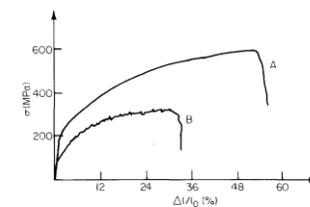
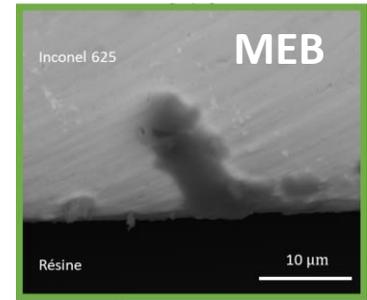
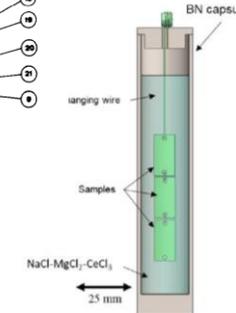
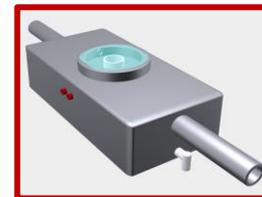
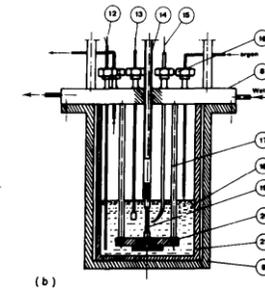
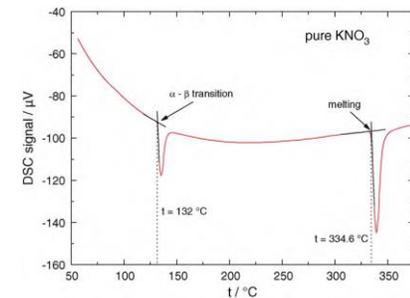


Fig. 2. Variation de la contrainte σ en fonction de l'allongement $\Delta l/l_0$ (acier inoxydable AISI 304L; atmosphère inerte, $N_2; v_t = 3,63 \times 10^{-4} s^{-1}$): courbe A, 20 °C; courbe B, 570 °C.

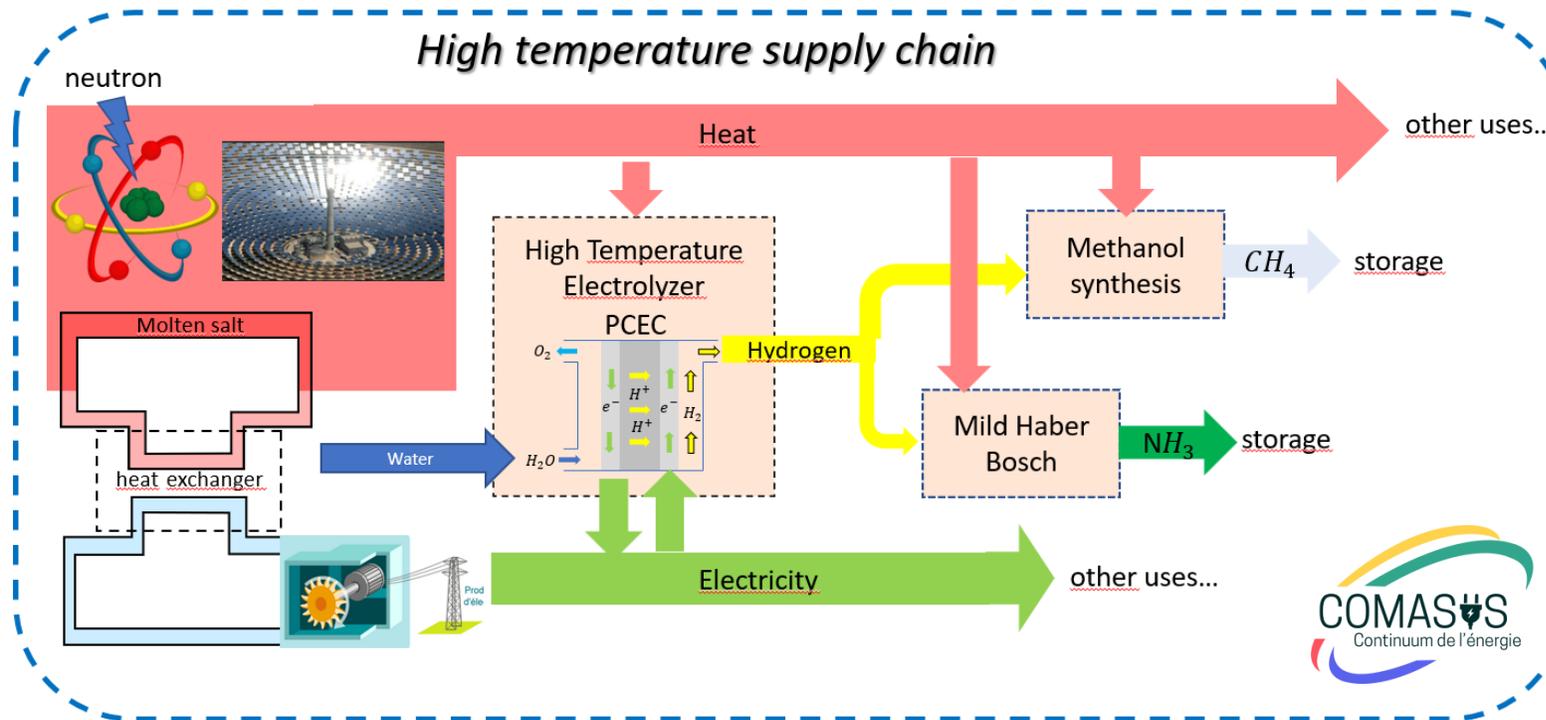


DSC



❑ Axe de développement : projet COMASYS

Utilisation de l'électricité et de la chaleur produite par les SMR pour décarboner la chaîne de production et de stockage de H₂



 Ensemble,
inspirons
demain



 Université
de Lille

Merci pour votre attention

Des questions ?

