



Feuille de route « Matériaux pour les énergies nucléaires »

La R&D des matériaux pour le nucléaire a évolué de la **métallurgie lourde** des premières générations de réacteurs électrogènes (Cuve des REP) à la **science des nano-matériaux sous conditions extrêmes**.

En effet, les structures des systèmes nucléaires se caractérisent par des conditions de fonctionnement extrêmes : hautes températures, contraintes mécaniques, irradiation, environnement corrosif, longues durées. La gestion de ces conditions exige une connaissance du matériau à l'échelle la plus fine et une recherche d'innovation à cette même échelle.

Cette évolution a été rendue possible par les progrès de la science des matériaux permis par des **moyens d'observation** de la matière toujours plus performants, et désormais jusqu'à l'échelle des atomes, et par des **moyens d'élaboration** permettant de contrôler la microstructure à l'échelle pertinente. Le développement des méthodes de simulation à l'échelle atomique (ab initio, dynamique moléculaire classique, Monte Carlo cinétique...) ont aussi permis une meilleure compréhension des phénomènes à leur niveau le plus fondamental. Ces progrès, notamment aux petites échelles, ont par exemple apporté des remèdes aux effets de l'irradiation ou de la plasticité par l'utilisation de nano-obstacles ou **nano-renforts**. Les enjeux de performance des matériaux demeurent cependant considérables, car les objectifs de rendement ont fait évoluer les conditions de fonctionnement vers des niveaux de fluence et de température très élevés, et d'autre part les objectifs de fiabilité et de sûreté imposent de prévenir et de gérer en sûreté les agressions externes (séisme, impact d'avion...) et les accidents graves avec fusion du cœur, de façon à éliminer toute conséquence durable sur la vie économique hors du site de la centrale.

Il est indispensable d'accroître la **connaissance** et de développer des **outils de simulation**, pour fournir aux ingénieurs des **méthodes et des outils robustes** dans une approche globale optimisée (**matériaux – mise en forme – assemblage – état de surface**).

1 CONTEXTE ET ENJEUX

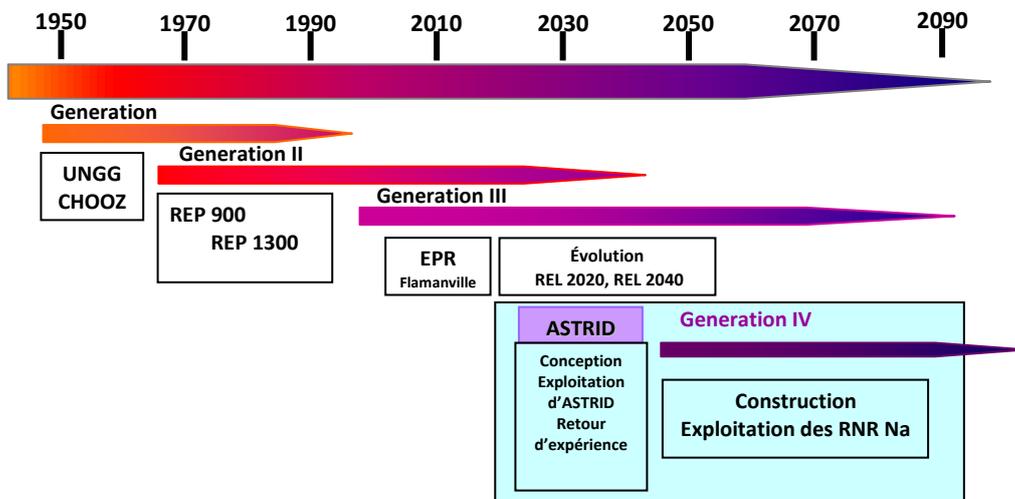
Les industriels et les chercheurs du nucléaire doivent disposer de méthodes fiables pour évaluer et justifier la durée de vie du parc nucléaire actuel, et développer de meilleurs matériaux (de façon incrémentale ou en rupture) pour les filières actuelles et pour le nucléaire du futur :

- **Filières nucléaires actuelles :**
 - Justification d'une durée de fonctionnement sûr des réacteurs jusqu'à 60 ans, et dans certaines conditions au-delà,
 - Optimisation de l'approche de sûreté et de la protection physique,
 - Amélioration de la compétitivité,
 - Réduction des risques d'incidents et d'accidents et de leurs conséquences,
 - Gestion sûre et économique des déchets radioactifs.

- **Nucléaire du futur :**

- Réalisation d'un prototype pour une nouvelle génération de réacteurs rapides refroidis au sodium (RNR-Na) dans la décennie 2020 (ASTRID),
- Déploiement d'une filière industrielle de réacteur à neutrons rapides (RNR) vers le milieu du 21^e siècle,
- Démonstration de la faisabilité et des potentialités des réacteurs rapides refroidis au gaz (RNR-gaz) avec la réalisation d'un réacteur expérimental dans la décennie 2020 ou 2030 (ALLEGRO),
- Evaluation de la viabilité scientifique, technologique et économique d'une première filière de réacteurs à Fusion au 21^e siècle.

Ces objectifs sont cohérents avec le calendrier de développement des filières de réacteur communément admis au plan international :



Ces grandes orientations sous-tendent des objectifs prioritaires :

- En continuité avec la R&D menée actuellement :
 - Extension de la durée de vie des REP 900 et 1300 MW au-delà de 40 ans,
 - Amélioration du taux de disponibilité du parc électronucléaire,
 - Nouvelle gestion du combustible MOX en parité de taux de combustion avec le combustible UO₂ moyennant une augmentation de la teneur en plutonium,
 - Amélioration de la fiabilité et de la robustesse des assemblages combustibles du point de vue de leur comportement hydromécanique,
 - Justification de la tenue des colis de déchets en regard de l'accroissement du nombre et de la diversité des flux de déchets,
 - Justification du gainage ODS pour le RNR-Na,
 - Optimisation des nuances d'acier pour en diminuer l'impact radiologique (aciers dits à « basse activation »).
- En rupture grâce à des innovations :
 - Evaluation du potentiel de réacteurs à eau présentant un haut facteur de conversion pour améliorer l'utilisation de l'uranium (et du plutonium),
 - Mise au point de matrices pour des combustibles à teneur accrue en actinides mineurs,
 - Conception de réacteurs pour une durée de fonctionnement sûr jusqu'à 80 ans,
 - Développement d'un gainage en SiC pour le combustible du RNR-gaz et potentiellement pour d'autres filières,
 - Développement de matériaux de structure pour des composants face au plasma dans les réacteurs à fusion (neutrons de 14 MeV, fort flux thermique).

2 VERROUS SCIENTIFIQUES

L'atteinte de ces objectifs dépend généralement de la tenue mécanique de structures ou d'équipements, et donc du comportement des matériaux qui les composent. On peut établir comme suit une première liste de verrous scientifiques majeurs à lever pour étayer la crédibilité et la compétitivité de la filière nucléaire, et pour identifier les thèmes de R&D qui en découlent :

Enjeux	Horizon	Verrous	Thèmes de R&D
Extension de la durée de vie des REP 900 et 1300 MW	2015	<ul style="list-style-type: none"> • Validation de l'extrapolation à 60 ans des méthodes d'évaluation de la tenue de la cuve • Modélisation prédictive du gonflement des matériaux austénitiques (internes de cuve) • Modélisation prédictive de la corrosion généralisée et de la corrosion sous contrainte • Modélisation du comportement sismique « de la faille à la structure » • Fiabilisation de l'instrumentation sous conditions extrêmes 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Aciers de cuve et structures internes</i> • <i>Mécanismes de corrosion</i> • <i>Ingénierie des surfaces pour milieux extrêmes</i> • <i>Vibrations, comportement dynamique</i>
Amélioration de la disponibilité du parc électronucléaire	2020	<ul style="list-style-type: none"> • Anticipation des problèmes du frottement/usure sous vibration • Modélisation prédictive des vibrations des tubes de générateur de vapeur en présence d'écoulements mono- et diphasiques 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Vibrations, comportement dynamique</i> • <i>Ingénierie des surfaces pour milieux extrêmes</i>
Amélioration de la gestion et de la fiabilité du combustible	2015	<ul style="list-style-type: none"> • Conception de combustible qui minimise les interactions « pastille-gaine » • Modélisation prédictive du comportement des combustibles : problématiques de la fissuration de la pastille et de la gaine, et du relâchement des gaz de fission • Compréhension des mécanismes de déformation des matériaux combustibles et du comportement mécanique de l'assemblage 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Matériau combustible</i>
Développement des matériaux pour les composants face au plasma d'un réacteur à fusion	2020	<ul style="list-style-type: none"> • Optimisation et qualification des alliages de tungstène incluant leur mise en œuvre • Modélisation prédictive du vieillissement incluant les effets des neutrons de 14 MeV 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Alliages de tungstène</i> • <i>Procédés métallurgiques avancés</i> • <i>Modélisation des effets d'irradiation</i>

Développement d'aciers à « basse activation »	2020	<ul style="list-style-type: none"> • Qualification des nuances d'aciers martensitiques permettant de réduire l'impact radiologique des matériaux de structure • Modélisation prédictive des effets d'irradiation, incluant l'effet des neutrons de 14 MeV. Développement des moyens de validation nécessaires	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Matériaux de structure martensitique à « basse activation »</i> • <i>Modélisation des effets d'irradiation</i>
Justification de la tenue des colis de déchets	2020	<ul style="list-style-type: none"> • Démonstration de la conservation de l'intégrité sur de très longues durées des colis de déchets radioactifs et de leur stockage • Acceptation des colis contenant des polymères organiques • Reprise et conditionnement des déchets anciens 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Matériaux de confinement (verres, béton, argiles)</i>
Justification du gainage ODS pour le RNR-Na	2020	<ul style="list-style-type: none"> • Elaboration, soudabilité, vieillissement, corrosion, potentialités de retraitement de matériaux du type ODS pour le gainage des RNR-Na 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Aciers renforcés par nano-structuration</i>
Développement de réacteurs à eau (REL) innovants	2025	<ul style="list-style-type: none"> • Tenue du gainage (augmentation des températures et des fluences) • Développement de combustibles et de poisons consommables aux performances accrues 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Composites pour milieux extrêmes</i> • <i>Matériau combustible</i>
Extension de la durée de fonctionnement des réacteurs jusqu'à 80 ans au moins	2030	<ul style="list-style-type: none"> • Validation de l'extrapolation à 80 ans des méthodes d'évaluation de la tenue de la cuve • Développement et validation du comportement des matériaux sacrificiels 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Aciers de cuve et internes</i> • <i>Ingénierie des surfaces pour milieux extrêmes</i> • <i>Matériaux réfractaires</i>
Développement du gainage pour le RNR-gaz	2030	<ul style="list-style-type: none"> • Etanchéité des gaines en composites SiC/SiC pour le RNR-gaz • Proposition d'un matériau alternatif au SiC/SiC pour le RNR-gaz 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Composites pour milieux extrêmes</i> • <i>Autres matériaux réfractaires</i>
Développement de matériaux avancés pour un réacteur à fusion	2030	<ul style="list-style-type: none"> • Tenue aux forts endommagements (200 dpa) induits par des neutrons de 14 MeV 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Composites pour milieux extrêmes</i> • <i>Acier ODS « basse activation »</i> • <i>Alliages de tungstène</i>

Il existe de nombreux cadres de coopération en France entre le CEA, le CNRS, les Universités et les Ecoles d'ingénieurs pour lever ces verrous scientifiques :

- Pour la **science de l'irradiation** : GIS JANNUS¹, GDR CPAMIR², Réseau EMIR³, LRC CARMEN⁴
- Pour les **matériaux métalliques sous irradiation** : GDR GEDEPEON⁵
- Pour les **céramiques** : GDR MATINEX⁶, LCTS⁷
- Pour les **verres** : GDR VERRES et GDR MATINEX
- Pour les **polymères** : CPR COPOLA⁸
- Pour les **matériaux et les structures soumis à des conditions exigeantes** : LRC MIST⁹ (IRSN, CNRS, Université de Montpellier)
- Pour la **simulation numérique semi-empirique et ab initio en physique et physico-chimie de la matière condensée** : GDR CoDFT¹⁰
- Pour la **mécanique** : UMR LaMSID¹¹
- Le « **grand défi Matériaux** » du Programme Interdisciplinaire du CNRS NEEDS¹² qui devrait être mis en place en 2012.

S'y ajoutent certains **projets financés par l'ANR** : AXTREM (Aciers ferritiques/martensitiques renforcés par nano-structuration), PLASMAX (Matériaux de structure avec phases MAX), MECAFIBRES (Caractérisation et modélisation multi-échelles du comportement mécanique de milieux fibreux), AFGRAP (Fissuration en fatigue thermique), HSynThEx (Modélisation de métaux à réseau cubique centré), OPTIDIS (Dynamique des dislocations), COMPOSIC (SiC/SiC).

Plusieurs grandes **infrastructures de recherche** en France contribuent au développement de matériaux pour les énergies nucléaires, parmi lesquelles :

- Pour la caractérisation : ESRF, SOLEIL, LLB,
- Pour la science de l'irradiation : outils du Réseau EMIR,

et d'autres sont prévues en Europe (source de spallation européenne (ESS), réacteur expérimental MYRRHA (SCK/Mol)) et dans le monde (IFMIF¹³ au Japon).

Deux **Instituts de recherche** à forte valeur ajoutée ont été créés en 2010 pour développer la science des matériaux nécessaire pour prolonger la vie des centrales nucléaires et innover pour les futurs réacteurs :

- **Materials Ageing Institute (MAI)** d'EDF, dédié au vieillissement des matériaux des réacteurs de puissance,
- **Materials Innovation for Nuclear Optimized Systems du CEA (MINOS)** dédié à la recherche sur l'ensemble des matériaux du nucléaire.

¹ Jumelage d'Accélérateurs pour les Nanosciences, le Nucléaire et la Simulation

² Chimie, Physique et Applications de la Matière sous Irradiation

³ Etudes des Matériaux sous Irradiation (Réseau national d'accélérateurs)

⁴ CARactérisation des Matériaux pour l'Energie Nucléaire, ECP/CNRS/CEA

⁵ Gestion des déchets et production d'énergie par des options nouvelles

⁶ MATériaux Innovants en conditions EXtrêmes

⁷ Laboratoire des Composites Thermo-Structuraux (UMR 5801)

⁸ Vieillissement des polymères industriels (2006-2011)

⁹ Laboratoire de Micromécanique et Intégrité des Structures

¹⁰ Code, Développement, Formalisme, Théorie

¹¹ Laboratoire de Mécanique des Structures Industrielles Durables

¹² Nucléaire : Energie, Environnement, Déchets, Société

¹³ International Fusion Materials Irradiation Facility

Plusieurs projets du programme d'investissement d'avenir ont permis de compléter les outils de recherche sur les matériaux pour les énergies nucléaires, parmi lesquels :

- L'*Institut de Recherche Technologique Jules Verne* appelé à faire émerger des innovations dans le domaine des technologies de production (*composites, métalliques et structures hybrides*),
- L'*Equipement d'excellence GENESIS* destiné à caractériser les matériaux irradiés à l'échelle nanométrique pour enrichir par une capacité de modélisation des phénomènes à ce niveau les outils de simulation multi-échelles des matériaux.

Plusieurs projets de recherche européens contribuent au développement de la science et de la technologie des matériaux pour les énergies nucléaires :

- **PERFORM60** (*Prediction of the Effects of Radiation For RPV and in-vessel Materials using MSM-60 years foreseen plant life time*) [7e PCRD]
- **GETMAT** (*Gen-IV and Transmutation Materials*) [7^e PCRD]
- **MATTER** (*Materials Testing and Rules*) [7^e PCRD]
- **Materials for Nuclear Energy** [*European Energy Research Alliance*].

S'y ajoute le **Centre Européen de Calcul Atomique et Moléculaire (CECAM)**, dont l'un des nœuds français est prévu dans la « *Maison de la simulation* » sur le plateau de Saclay et qui fournit déjà un cadre de coopération sur les techniques de modélisation ab initio et multi-échelles en science des matériaux.

Au-delà de l'Europe, les initiatives récentes les plus marquantes comprennent la création mi-2011 :

- du **MIT-CNRS Joint Material Laboratory**, et
- du réseau de recherche international **Multiscale Materials Under the Nanoscope (M²-U-N)** entre Laboratoires américains (MIT, UC-Berkeley, U-Princeton, NIST-Gaithersburg), Français (CNRS, IRSN, CEA, IRD, LCPC, Université Aix-Marseille, UPMC, UJF, UCBL, EP, ENPC, INPG) et d'autres pays européens (Oxford University, LBEIN Tecnalia-Bilbao, ETH – Zürich, EPF-Lausanne).

3 PROPOSITION DE PROGRAMME

Un effort accru doit être mené sur les thèmes suivants dont les actions prioritaires sont identifiées.

3.1 Les aciers de cuve, d'internes et des circuits

Problématiques prioritaires :

- Compréhension et simulation des interactions neutron/matière (irradiations neutroniques ou simulées par faisceaux d'ions, caractérisation à l'échelle nanométrique) et de leur influence sur la plasticité, la transition ductile/fragile (aciers ferritiques faiblement alliés des cuves), le gonflement et le fluage (aciers inoxydables austénitiques des internes),
- Développement de nouveaux matériaux (aciers ferritiques/martensitiques, aciers 2-1/4 Cr, aciers martensitiques à « basse activation »),
- Développement de critères d'amorçage physiquement fondés en fatigue et fluage,
- Développement et validation des modélisations fondées sur la physique pour une plateforme de simulation du comportement des matériaux de cuve et des structures internes.

3.2 Les mécanismes de corrosion

La compréhension puis la modélisation des mécanismes de corrosion exigent de descendre à l'échelle atomique ou moléculaire :

- Compréhension de la formation des produits de corrosion et de l'évolution des couches passives (corrosion généralisée des aciers inoxydables, aciers base nickel et alliages de zirconium),
- Modélisation de la corrosion sous contrainte localisée : rupture de la couche passive, modélisation mésoscopique, fragilisation par l'hydrogène,
- Développement et validation d'une modélisation multi-échelle, multi-matériaux et multi-milieus du comportement des matériaux dans l'environnement nucléaire.

La structuration de la communauté scientifique sur ce sujet est une priorité qui pourrait prendre la forme d'un GDR.

3.3 Les alliages de zirconium

Les alliages de zirconium sont des matériaux clés pour le gainage des réacteurs à eau. Leur évolution aura une influence décisive sur la compétitivité des réacteurs actuels et le comportement du combustible en situation accidentelle grave en réacteur et dans les piscines de stockage.

Les priorités de recherche portent sur :

- le comportement sous flux des matériaux de gainage et de structure d'assemblage, particulièrement en fluage et croissance,
- le comportement en situations accidentelles : oxydation du zirconium par la vapeur d'eau, réaction du zirconium avec l'air.

3.4 Le matériau combustible

Les priorités de recherche portent sur :

- les propriétés de diffusion dans les oxydes d'actinides : mesures expérimentales et simulation,
- la maîtrise du comportement sous irradiation de la matrice combustible : effets athermiques, comportement des défauts et des produits de fission...
- les propriétés générales des matériaux combustibles des filières nucléaires de Génération IV : propriétés thermodynamiques et effets d'irradiation,
- le rôle des additifs, dopants et poisons consommables sur les propriétés de transport et sur l'endommagement,
- le développement et la validation des modélisations aux échelles atomiques et mésoscopiques.

3.5 Les aciers renforcés par nano-structuration

Pour l'application aux gaines des RNR-Na ou pour des applications plus prospectives de la filière REL, les aciers ODS martensitiques présentent à la fois une bonne résistance aux effets d'irradiation induits par les déplacements atomiques, notamment le gonflement, du fait de leur structure cristalline cubique centrée, et une résistance accrue au fluage à chaud grâce à la dispersion d'une forte densité d'amas nanométriques. Ces matériaux font l'objet d'un Contrat de Programme de Recherche (CPR) entre le CEA, le CNRS, Mécachrome, EDF et AREVA (CPR ODISSEE). Les nuances permettant de réduire l'impact radiologique sont aussi à considérer.

Le CPR ODISSEE est destiné à maîtriser des problèmes de base posés par la mise en œuvre et l'emploi des aciers ferritiques ODS en tant que matériaux de gainage soumis au fort flux de neutrons rapides des futurs réacteurs rapides de Génération IV et du prototype

ASTRID (les futurs réacteurs à fusion sont hors des objectifs de ce CPR). Les problèmes de base concernent plus particulièrement :

- La maîtrise du broyage,
- L'étude expérimentale des transformations de phase sous broyage et sous traitements thermiques,
- L'étude expérimentale de la stabilité sous vieillissement thermique et irradiation,
- Le comportement mécanique,
- La modélisation physique et la validation expérimentale des propriétés de cohésion et des cinétiques d'alliages modèles de complexité croissante.

3.6 L'ingénierie des surfaces pour milieux extrêmes

Les matériaux utilisés dans les réacteurs actuels ou du futur sont amenés à fonctionner dans des conditions exigeantes où les surfaces seront soumises à la corrosion, l'oxydation, l'usure, le frottement, le fretting, l'irradiation... souvent en même temps. L'ingénierie de surface peut apporter des solutions efficaces pour augmenter la durée de vie des composants tout en minimisant la consommation des ressources. Des besoins de revêtement sont identifiés pour protéger d'une manière générale les métaux des agressions de leur environnement (barrières anti-oxydation, anti-érosion, anti-fragilisation par les métaux liquides...) et pour optimiser certaines propriétés de surface : mouillage, dépollution... Des procédés nouveaux ou améliorés doivent être proposés et validés pour apporter des solutions à ces problèmes. Il est proposé de les étudier dans le cadre du **CPR SUMIX** : programme de recherche technologique de base sur l'ingénierie des surfaces en milieux extrêmes, pour applications multi-industries (énergie nucléaire et énergies alternatives, aéronautique et spatial, mécanique haute performance). Il comporte trois axes technologiques (I-PVD, DLI-CVD, LPPS) et trois axes génériques (nano structuration et propriétés en environnement, évaluation non destructive en environnements extrêmes, simulation numérique pour la conception de solutions optimisées).

3.7 Les procédés métallurgiques avancés

Les propriétés des matériaux sont fortement liées aux procédés utilisés pour leur élaboration, leur mise en forme et leur assemblage. Des progrès sont à attendre de nouvelles techniques avancées de fabrication pour applications nucléaires : frittage par plasma à étincelle (*Spark Plasma Sintering (SPS)*), frittage par micro-ondes, prototypage rapide (fabrication directe « *Near Net Shape* »), compression isostatique à chaud (CIC), usinage rapide, écrouissage au laser (*Laser Shock Peening*), soudage par friction (*Friction Stir Welding*), élaboration de matériaux à gradients de propriétés pour les tubes bimatériaux, matériaux multicouches... (métallurgie des poudres, nanostructuration, fonctionnalisation de surfaces). La robustesse de ces procédés requiert une utilisation optimisée de la **simulation numérique des procédés** et le développement de procédés de contrôle en temps réel.

3.8 Les composites pour milieux extrêmes

Les matériaux composites à matrice céramique sont actuellement étudiés comme matériaux de gaine pour combustible de RNR-gaz ou sodium (multicouches ou à gradient de composition), voire pour combustibles de réacteurs à eau. Les besoins de connaissance suivants sont prioritaires :

- Optimisation des procédés d'élaboration en fonction de la forme et des modes de sollicitation des pièces (tissage),
- Compréhension du comportement sous irradiation et identification des lois de comportement,
- Influence des gaz rares et du césium dans le carbure de silicium,

- Conservation de l'étanchéité et de la conductivité thermique en fonctionnement, tenue aux chocs, détection des défauts,
- Méthodes d'assemblage de ces matériaux.

Enfin, il convient de noter que les fibres SiC de ces matériaux sont presque totalement fabriquées par des entreprises hors de la communauté européenne, ce qui pose un problème stratégique.

3.9 Matériaux pour la Fusion

- Aciers Martensitiques, ODS, céramiques (SiC...): extension du domaine de recherche et développement pour les conditions de fonctionnement spécifiques non évoquées précédemment,
- Développement d'alliages de tungstène pour les applications dans un réacteur à fusion.

3.10 Les autres matériaux réfractaires

Problématiques prioritaires :

- Recherche de matériaux réfractaires performants pour le récupérateur de réacteurs à eau,
- Veille sur les matériaux réfractaires alternatifs pour les gaines de RNR-Gaz (Vanadium).

3.11 Les matériaux de confinement (verres, bétons, argiles)

Le conditionnement des déchets est un sujet central pour l'avenir de l'énergie nucléaire. Les deux principales matrices de confinement vers lesquelles converge l'ensemble de la communauté internationale sont les verres pour les déchets de haute activité, et les matériaux cimentaires pour les déchets de faible ou moyenne activité. Le domaine des verres qui est vaste et complexe, est déjà traité dans les GDR VERRES et MATINEX appelés à trouver un prolongement dans le programme NEEDS.

Des thèmes de recherche complémentaires sont à développer de manière prioritaire :

- La réactivité chimique aux interfaces entre matériau de confinement et déchets,
- Les relations entre structure et propriétés,
- La modélisation/simulation atomistique des phases cimentaires et la thermodynamique des systèmes verriers et cimentaires, pour aller vers une approche prédictive de l'élaboration des verres d'intérêt (pourrait faire l'objet d'un CPR).

3.12 La mécanique des structures

Problématiques prioritaires :

- Développement de méthodes innovantes en mécanique des structures : mesure de champs, méthodes de calcul à précision contrôlée, méthodes multi-échelles en mécanique et en interaction fluide-structure,
- Compréhension/modélisation de l'usure vibratoire engendrée par les phénomènes de fretting dans les assemblages des REP et d'usure/corrosion en milieu sodium,
- Séisme, dynamique rapide : modélisation/essai à des échelles locales fines,
- Génie civil : modélisation des bétons armés, impacts d'avions, vieillissement, initiation et propagation de fissures, fuites dans les enceintes,
- Relations entre procédés de fabrication et durée de vie,
- Endommagement et rupture des structures (métalliques et bétons),
- Couplages avec les structures, identification de données, réduction de modèles,

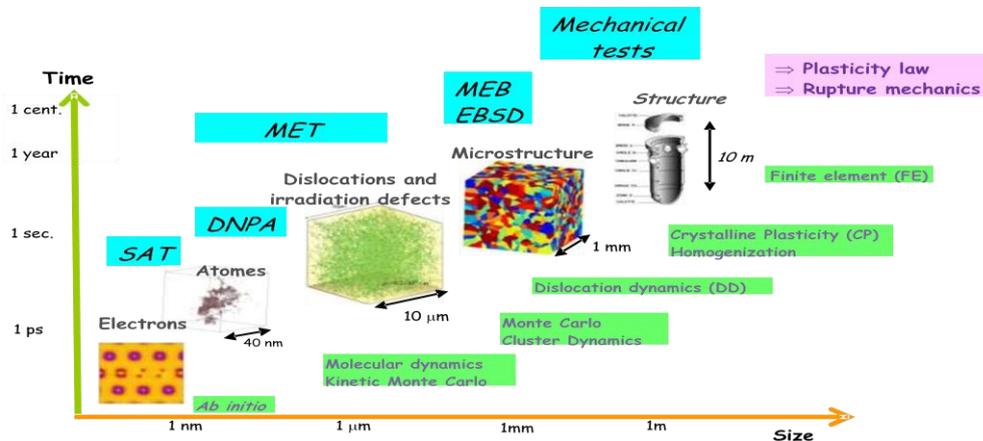
- Intégrité des structures hétérogènes et évolutives.
- Approches expérimentale et numérique innovantes en dynamique des structures (séisme, dynamique rapide, chocs, impacts), en particulier via des essais de type hybride,
- Raccordement des échelles entre simulation des matériaux et simulation des structures.

3.13 Compréhension/modélisation/simulation multi-échelles

Des actions de compréhension physique, caractérisation, modélisation, simulation, sur des objectifs transverses, sont nécessaires pour structurer de façon efficace la R&D des matériaux pour le nucléaire (incluant des neutrons rapides (14 MeV)) :

- Améliorer la connaissance pour rendre plus fiable la prédiction des phénomènes de vieillissement et de dégradation sous irradiation : cinétique, transport et diagrammes de phases, structure des cascades dans les alliages métalliques, les composés iono-covalents ou les verres d'oxydes, stabilité sous irradiation des précipités, de la plasticité et du comportement des réseaux de dislocation dans les matériaux métalliques,
- Aider à la conception de matériaux à cinétique d'évolution maîtrisée, proposer de nouvelles formulations et méthodes d'élaboration,
- Favoriser la recherche expérimentale dans des domaines peu étudiés comme la diffusion sous irradiation ou l'évolution des contraintes sous irradiation.

Il est indispensable d'utiliser les connaissances physiques dans des outils de **modélisation/simulation multi-échelles et multi-physiques**, accessibles à une large communauté de chercheurs et d'ingénieurs, et associés à des moyens de caractérisation aux mêmes échelles :



Modélisation/simulation multi-échelle des matériaux

- Moyens de caractérisation
- Modélisation à la même échelle

A chacune des échelles, des codes existent déjà dans différentes communautés de chercheurs, et sont parfois partagés entre les communautés. Des plateformes multi-échelles structurées commencent à émerger.

Les priorités dans ces domaines sont multiples :

- Communiquer sur les outils, les comparer sur des problèmes d'intérêt pour le nucléaire et partager ces codes si nécessaire,
- Solliciter la communauté des « mathématiques appliquées » pour apporter un soutien en analyse numérique afin d'optimiser le fonctionnement de ces codes et leur portage sur des machines à haute performance (HPC),
- Permettre l'accès à des moyens de calcul hautes performances.

NB : la question de l'approvisionnement des métaux et matériaux critiques (U, Zr, fibres SiC) pour l'énergie nucléaire doit être traitée dans le cadre plus large de la R&D contribuant à la sécurisation des approvisionnements en matériaux stratégiques.

3.14 Expérimentation

- Planifier le renouvellement des accélérateurs et des équipements associés, en incluant l'émergence des équipements prévus pour la fusion (source de neutrons de 14 MeV IFMIF¹⁴),
- Développer les moyens d'élaboration de matériaux par l'aide au financement de plateformes dédiées,
- Développer les moyens de caractérisation du comportement sous irradiation, aux échelles pertinentes :
 - Nano-caractérisation des matériaux irradiés, matériaux métalliques et matériaux à base d'actinides (cf. plateformes GENESIS¹⁵, ligne MARS de SOLEIL),
 - Nano-caractérisation de combustible nucléaire irradié,
 - Mesures en ligne associées à la simulation de l'irradiation par faisceaux d'ions,
 - Analyses chimiques, structurales et analyses d'échantillons irradiés par diffractométrie de rayons X,
 - Développement du potentiel de mesures par positons et micro-Raman pour mesurer les populations de défauts,
 - Mesures de champs.
- Former les jeunes chercheurs aux techniques de pointe et aux effets des irradiations,
- Intégrer modélisation et expérimentation dans les structures de type Labex (plateforme de multi-irradiation JANNU¹⁶ est associé à la physique des matériaux dans le Labex PALM¹⁷).

3.15 Collaborations

La dynamisation des collaborations est nécessaire pour mener à bien les actions de R&D présentées ci-dessus :

- Permettre le développement de collaborations internationales : l'Inde (IGCAR, BARC) et les USA (projet FMM (*Fundamental Material Modeling*) de l'initiative NEAMS¹⁸) ont des programmes de grande ampleur concernant les matériaux du nucléaire. Des financements incitatifs doivent être dédiés à ces collaborations ciblées,
- Améliorer le fonctionnement des réseaux nationaux et européens, accroître la visibilité de cette recherche et attirer des étudiants et de jeunes chercheurs. Les initiatives en cours (METSA¹⁹, EMIR²⁰, SPIRIT²¹) doivent être pérennisées.

¹⁴ IFMIF : International Fusion Materials Irradiation Facility

¹⁵ GENESIS : Groupe d'Etudes et de Nano-analyses des Effets d'Irradiation

¹⁶ JANNU^S : Jumelage d'Accélérateurs pour les Nanosciences, le Nucléaire et la Simulation

¹⁷ PALM : Physique : Atomes, Lumière, Matière

¹⁸ NEAMS : Nuclear Energy Advanced Modeling and Simulation

¹⁹ METSA : Microscopie Electronique et Sonde Atomique

²⁰ EMIR : Réseau national d'accélérateurs pour les Etudes de Matériaux sous Irradiation

²¹ SPIRIT : Support of Public and Industrial Research Using Ion Beam Technology (*Programme du 7^e PCRD*)

4 CALENDRIER

4.1 *Développement de matériaux*

Jalons pour les matériaux des cuves et internes :

- 2010-2015 : mettre à disposition les premiers outils de prédiction sur des bases physiques de la ténacité des aciers de cuve et des conditions de fissuration en service des internes de cuve (corrosion sous contrainte assistée par irradiation),
- Au-delà de 2015 : consolider ces outils pour extrapolation à des durées de fonctionnement au-delà de 60 ans.

Jalons pour les aciers ODS des gaines de combustibles RNR-Na :

- 2012 : valider le choix de l'ODS et définir la nuance de référence,
- 2010-2015 : préparer la phase d'industrialisation afin de transférer à un industriel le procédé retenu et établir les bases de données nécessaires au dimensionnement,
- Au-delà de 2015 : élaborer un plan de collaboration internationale pour réaliser le programme d'irradiations expérimentales nécessaire pour valider une augmentation des performances sur le gainage du combustible.

Jalons pour un gainage SiC/SiC de combustibles RNR-gaz :

- 2011-2015 : caractériser le comportement du matériau après irradiation,
- 2012-2017 : proposer et valider le choix du mode d'élaboration et d'assemblage,
- Au-delà de 2018 : préparer l'industrialisation afin de transférer à un industriel le procédé retenu, et établir des bases de données nécessaires au dimensionnement.

Jalons pour les matériaux d'un réacteur à fusion (programme international) :

- 2011-2020 : valider et qualifier les options actuellement retenues pour ITER et un démonstrateur de réacteur à fusion (acier martensitique « Eurofer » comme matériau de structure, alliage de tungstène pour le Divertor),
- 2011-2020 : développer la source de neutrons de 14 MeV IFMIF,
- Au-delà, développer des matériaux avancés pour un réacteur à fusion (fort dpa sous flux de 14 MeV) : composites pour milieux extrêmes, aciers ferritiques/martensitiques ODS « basse activation », alliages de tungstène, solutions en rupture.

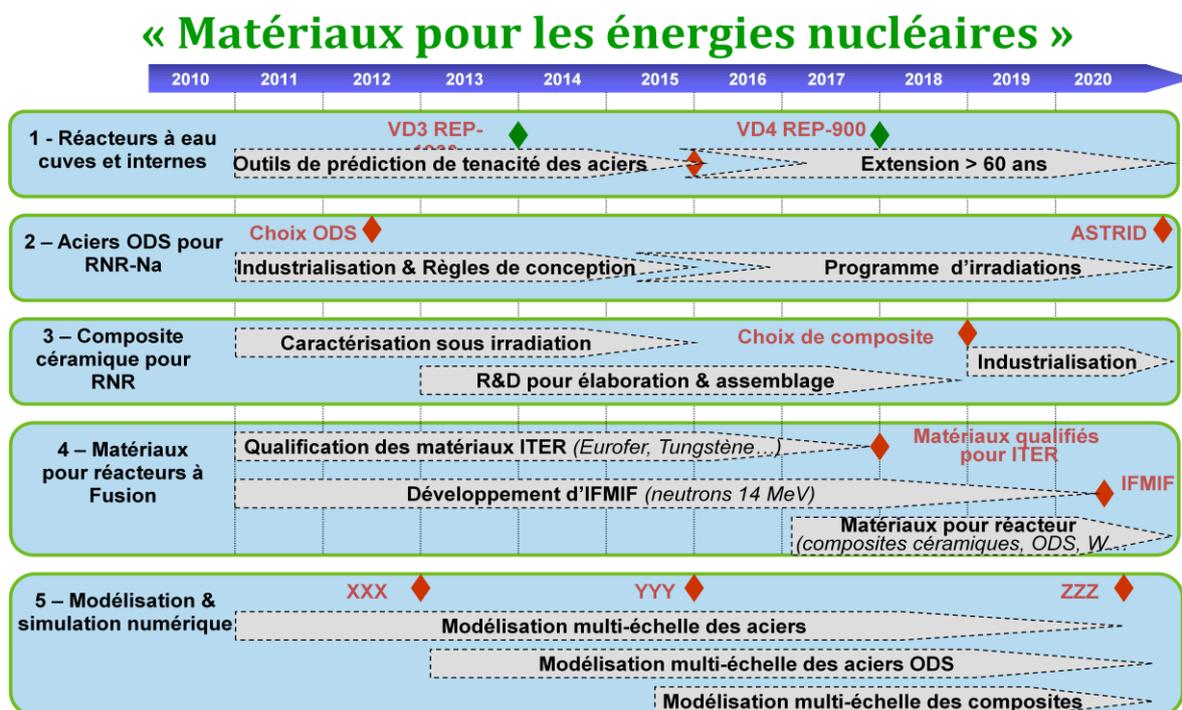
4.2 *Développement de méthodologies de conception/validation*

Le développement de méthodologies prédictives pour la tenue des matériaux nécessite la structuration des actions de R&D par une approche multi-échelles et multi-physiques qui requiert la connaissance des mécanismes fondamentaux aux échelles pertinentes, et dont la robustesse est garantie par la démarche caractérisation/modélisation/simulation/validation.

Pour ces méthodes, les objectifs recherchés sont :

- Pour les matériaux métalliques : développer et valider des modèles physiques aux différentes échelles pour élaborer **dans les 10 ans** une boîte à outils multi-échelles et multi-physiques dédiée à la compréhension et la prévision des effets d'irradiation, du comportement en plasticité, de transition ductile-fragile et du comportement en corrosion,
- Pour les matériaux céramiques : développer des modèles de comportement sous irradiation (effets de charge et de migration atomique), de transport et d'endommagement à un **horizon de 15 ans**.

Le calendrier d'ensemble du programme est le suivant :



5 MOYENS NECESSAIRES ET PARTENARIATS

Le programme proposé dans le cadre de l'ANCRE vise à renforcer la coopération existante entre Laboratoires de recherche et industriels sur les matériaux pour l'énergie nucléaire, notamment par la mise en place de Contrats Programmes de Recherche ou Groupements de Recherche sur de nouvelles thématiques. Les moyens nécessaires à cet accompagnement sont évalués à ~10 M€/an (actions de GdR, CPR, ANR, NEEDS, PIA²²...)

De nombreuses équipes CEA, CNRS, Université et IRSN travaillent ou sont susceptibles de travailler sur les matériaux pour le nucléaire. Une liste indicative en est donnée en annexe 1.

L'Alliance **ANCRE** pourrait apporter un soutien essentiel à quelques initiatives phares :

- Structurer la communauté de la corrosion des métaux dans l'environnement nucléaire, par la création d'un **GDR Corrosion**,
- Permettre de maintenir une recherche académique pertinente et d'excellence sur les matériaux du nucléaire, en soutenant le **programme Matériaux et le programme NEEDS du CNRS**,
- Soutenir la recherche sur les matériaux sous irradiation, en incluant spécifiquement et explicitement cette thématique dans les appels à projets actuels (ANR Mat&Pro, Programme Blanc/SIMI-9²³, Modèles Numériques, Programme Jeunes chercheurs - ou Investissement d'avenir...) ou en créant un **appel spécifique ANR sur la thématique « Matériaux sous irradiation »**,
- Accroître la collaboration entre les équipes, la synergie entre les disciplines et le maintien des capacités de mesure et de caractérisation au sein des laboratoires, en tirant le meilleur parti des initiatives d'excellence suivantes :
 - **Labex LaSIPS²⁴, PALM** dans le cadre de l'**Université Paris-Saclay**,
 - **Equipex GENESIS**.

²² PIA : Programme d'Investissements d'Avenir

²³ ANR (2010) SIMI-9 : Sciences de l'ingénierie, matériaux, procédés, énergie

²⁴ LaSIPS : Laboratoire Systèmes et Ingénierie de Paris Saclay

6 LIEN ENTRE RECHERCHE ET ENSEIGNEMENT

Plusieurs enseignements contribuent de façon active à cette thématique :

- le Master International "Nuclear Energy" (MNE) en région parisienne (ParisTech, Centrale Supélec, Université de ParisSud-11, INSTN), qui bénéficie d'un large soutien industriel et du CEA, comprend des enseignements sur les matériaux dans différentes options,
- Des enseignements plus spécifiques en science des matériaux sont dispensés à l'Université Paris-6, à l'ENSTA, à l'ECP, à l'ENPC et à l'Ecole des Mines de Nantes. Dans la cadre des enseignements de chimie de l'ENSCP, de l'ENSCM et de l'université de Montpellier, les matériaux sont également abordés,
- Un Master "Matériaux de structure pour l'énergie" est porté par l'INSTN, l'Université ParisSud-11, l'ECP, l'ENSCP et l'Ecole Polytechnique,
- L'Institut National Polytechnique à Grenoble a créé un Master International "Materials Science for Nuclear Energy" (MANUEN) qui traite à la fois des matériaux de structure et du combustible nucléaire en partenariat avec EDF et le CEA,
- Des programmes de formation sur les matériaux pour l'énergie nucléaire ont récemment été créés à l'ENSCI de Limoges (parcours de 3^e année sur les matériaux pour le nucléaire) et à l'Ecole des Arts et Métiers d'Aix-en-Provence (enseignement de 3^e année sur les matériaux avancés pour l'énergie),
- L'Ecole internationale "Nuclear Engineering" qui dispense annuellement un enseignement de niveau doctoral à l'INSTN à Saclay, comportant trois modules traitant des matériaux : matériaux de structure, combustible et gestion des déchets radioactifs.

Le rapprochement sur le plateau de Saclay, dans le cadre de l'Université Paris-Saclay, de plusieurs établissements d'enseignement supérieur (ParisSud-11, Polytechnique, Centrale, ENSTA, ENS Cachan), à proximité du centre d'excellence sur les matériaux du nucléaire du CEA (MINOS) doit permettre d'enrichir cette thématique, à la fois dans le contexte de la science des matériaux et de leur application à l'énergie, et dans celui d'une offre régionale bénéficiant de fortes synergies, en complément de l'offre existante.

Références :

- 1 – "Science des matériaux pour le nucléaire", Clément Lemaignan, EDP Sciences, 2004
- 2 – "Rapport d'évaluation des recherches sur les systèmes nucléaires du futur", Rapport élaboré par un groupe d'experts mandaté par le Haut-commissaire à l'énergie atomique, 2008
- 3 – "Matériaux du nucléaire", Rapport sur la science et la technologie de l'Académie des sciences n°5, Éditions Tec & Doc, Juillet 2000
- 4 – Nuclear Energy, Research and Development Roadmap, Report to Congress Avril 2010, US Department of Energy (DOE)
- 5 – "A global legal framework to meet the Climate Change Challenges", Alain Bucaille, Imperial College, Londres, Avril 2010

Contributeurs à ce document

CEA : Françoise Touboul (DEN, co-animatrice), Serge Bouffard (DSM), Laurent Chaffron (DEN), Christophe Dellis (DEN), Guillaume de Dinechin (DEN), Damien Féron (DEN), Bernard Marini (DEN), Ch. Phalippou (DEN), David Siméone (DEN), Etienne Vernaz (DEN)

CNRS : Francis Teyssandier (LCTS/Bordeaux, co-animateur), Thierry Allard (IMPMP/Paris), Alain Pasturel (SIMAP/Grenoble)

CEA / CDEFI : Philippe Barboux (ENSC-Paris), Alain Combescure (INSA-Lyon), Philippe Marcus (ENSC-Paris), Jean-Claude Niepce (U-Bourgogne/Dijon), Philippe Pareige (U-Rouen), Denis Mazuyer (EC-Lyon),

IFPEN : François Ropital

Sigles et acronymes

MOX :	"Mixed Oxide Fuel » : combustible constitué d'un mélange d'oxydes d'uranium (UO ₂) et de plutonium (PuO ₂)
ODS :	Oxide Dispersion Strengthened Steel
R & D :	Recherche et Développement
RNR-gaz :	Réacteur à neutrons rapides refroidi au gaz (Gas Fast Reactor, GFR)
RNR-Na :	Réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium (Sodium Fast Reactor, SFR)
REP :	Réacteur à eau pressurisée
REL :	Réacteurs à eau légère
RNR :	Réacteur à neutrons rapides
DLI-CVD	Direct Liquid Injection – Chemical Vapor Deposition
i-PVD	Ionized Physical Vapor Deposition
LPPS	Low Pressure Plasma Spraying

ANNEXE-1
Laboratoires impliqués dans les recherches
sur les matériaux pour l'énergie nucléaire
(Liste non exhaustive)

- **CEA**
 - **Direction de l'énergie nucléaire**
 - DMN : Département des matériaux pour le nucléaire
 - DEC : Département d'étude des combustibles
 - DPC : Département de physico chimie
 - DM2S/SEMT : Service d'études mécaniques et thermiques
 - DM2S/LGLS : Laboratoire de génie logiciel et de simulation
 - DTCD : Département de traitement et de conditionnement des déchets
 - DTN : Département de technologie nucléaire
 - **Direction des sciences de la matière**
 - Laboratoire Léon Brillouin
 - Laboratoire des solides irradiés
 - CIMAP/CAEN
 - **Direction des applications militaires** : sites du Ripault, de Valduc et de Bruyère-le-Châtel.

- **IRSN**
 - Service d'étude et de modélisation du combustible en situations accidentelles
 - Service d'étude et recherche expérimentale sur les matériaux
 - Service d'analyse des matériels et des structures

- **IFP Energies nouvelles**

- **CNRS**
 - CEMES Toulouse
 - ECP Paris
 - ECP/SPMS
 - ENSCP Paris
 - ENSMP Paris
 - GPM Rouen
 - INSA Lyon
 - INSA Toulouse
 - ICB Dijon
 - IMPMC Paris
 - IM2NP Marseille
 - ISMM Mulhouse
 - LaMCoS Lyon
 - LCTS Bordeaux
 - LEM Nancy
 - LPC Paris
 - LTDS Lyon
 - MATEIS Lyon
 - NAVIER Paris
 - SIMAP Grenoble