

AVIS DU COMITE SCIENTIFIQUE DE L'ASN RELATIF AUX RECHERCHES CONSACREES AU VIEILLISSEMENT DES MATERIAUX NON METALLIQUES

Le vieillissement des matériaux non métalliques constitue un domaine de recherche à prendre en compte dans le contexte actuel d'extension de la durée d'exploitation des réacteurs de puissance au-delà de 40 ans. Afin d'établir un avis sur les programmes de recherche en cours dans ce domaine, et sur les orientations à leur donner, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a sollicité le support de son comité scientifique. La mission donnée a été cadrée par une fiche « Recherche » établie par la Direction des centrales nucléaires (DCN) de l'ASN qui explicite les enjeux de sûreté, le contexte national et international. Elle a été complétée par des entretiens avec les chercheurs des organismes suivants : Electricité de France (EDF), l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) et l'Université Gustave Eiffel (UGE).

L'ensemble des informations collectées a permis de disposer d'une vue assez complète de la recherche engagée en France sur la compréhension des phénomènes de vieillissement des composants non métalliques et difficilement remplaçables, équipant les réacteurs de puissance en exploitation.

Globalement, le comité scientifique estime que les démarches de recherche et de développement mises en œuvre apparaissent comme pertinentes et efficaces, avec un bon équilibre entre expérimentation et modélisation, caractérisée notamment par le développement des approches multi-échelle. A cet égard, le bénéfice des travaux précurseurs menés sur les matériaux métalliques est à souligner et à mettre au crédit de la maturité croissante des approches par le calcul.

Les problématiques majeures sont couvertes de manière adaptée et cohérente avec les enjeux et les calendriers de la 4^{ème} visite décennale des réacteurs du parc et le comité estime que ces recherches s'inscrivent dans une perspective à plus long terme.

Les programmes de recherche sont généralement développés dans le cadre de partenariats multiples et font l'objet d'un partage à l'international notamment dans le cadre d'Euratom. A ce sujet, le comité note l'existence de très nombreux échanges entre les organismes techniques et scientifiques, supports des Autorités de sûreté, et les exploitants.

Tous les programmes tirent également profit des compétences et des moyens de la recherche académique française, dans le cadre de très nombreux partenariats.

Les investigations menées n'ont pas mis en évidence de besoins spécifiques supplémentaires, ni de recherches nécessaires pour des installations nucléaires autres que les réacteurs de puissance, à l'exception peut-être des installations devant être utilisées pour le stockage souterrain, sujet qui pourrait, le cas échéant, faire l'objet d'un complément d'étude et d'un avis du comité.

Le comité recommande donc que l'ASN soutienne les recherches en cours et encourage le maintien *à minima* au niveau actuel du réseau de recherche sur le vieillissement des matériaux non métalliques, vu l'ampleur, la qualité et la densité des partenariats entre acteurs nationaux et européens de la recherche et du développement sur un sujet crucial pour la sûreté nucléaire.

Par ailleurs, le comité considère que les examens et contrôles non destructifs, associés le cas échéant à un suivi en ligne, constituent en matière de sûreté une ligne de défense importante qui pourrait mériter

un renforcement et une meilleure mutualisation des efforts de recherche, notamment au niveau européen. En effet, à ce jour, ce thème de recherche n'a constitué, dans les projets internationaux, qu'un axe de recherche secondaire ne mobilisant à chaque fois que peu de partenaires.

Le comité estime donc qu'il serait souhaitable que l'ASN encourage le lancement de projets de recherche fédérant tous les efforts et les compétences nécessaires sur un axe central dédié aux contrôles non destructifs. Ces projets de recherche pourraient être nationaux, comme une suite au projet ENDE (Evaluation Non Destructive des Enceintes de confinement des centrales nucléaires), retenu dans le cadre de l'appel à projets "Recherche en sûreté nucléaire et en radioprotection" du programme « Investissements d'Avenir », cofinancé par l'Agence nationale de la recherche, et achevé en 2021, ou européens dans le cadre d'Euratom. Ils pourraient être l'occasion d'engager également des recherches concernant les contrôles et les mesures à réaliser dans des zones d'accès difficile.

D'autre part, le démantèlement des réacteurs de Fessenheim permettra de disposer de matériaux, notamment de câbles électriques, ayant vieilli *in situ*. Le comité estime que l'accès à ces matériaux pour l'analyse de leur vieillissement par les laboratoires impliqués dans ces recherches doit être encouragé et facilité. Cette recommandation vaut d'ailleurs pour tout autre type de matériaux et de matériels d'intérêt, au terme de leur utilisation dans toute installation nucléaire.

Compte tenu de ses échelles de temps, la recherche doit savoir anticiper les expressions de besoin. Il est cependant difficile d'engager des recherches spécifiques sur tous les nouveaux matériaux qui pourront équiper les installations nouvelles, en cours de construction ou de conception. Il apparaît donc important pour le comité de poursuivre, voire d'accroître, les efforts engagés sur la modélisation multi-échelle. En effet, plus les connaissances acquises prennent appui sur une compréhension fine des phénomènes mis en jeu, plus aisée sera la transposition de ces connaissances et des modèles associés à de nouveaux matériaux. Cette recommandation vaut aussi pour une meilleure prise en compte des conditions de fabrication, de construction ou d'exploitation, y compris pour des matériaux connus, qui seraient susceptibles d'avoir un impact sur le vieillissement des matériaux non métalliques.

Le comité tient à souligner que les membres en charge des investigations sur ce sujet ont pu accomplir leur mission d'information scientifique et technique sans que le rattachement du comité à l'ASN, donc à une fonction première d'inspection réglementaire, vienne interférer dans leurs relations. Avec tous les interlocuteurs, le contact a été ouvert et productif, l'accès aux résultats des travaux et aux installations a été transparent, soutenu par des présentations de qualité. Les réponses aux questions et demandes de précision ont été tout aussi transparentes.

ANNEXE

1/ Introduction

Le vieillissement des matériaux non métalliques constitue un domaine de R&D à prendre en compte dans le contexte actuel d'extension de la durée d'exploitation des réacteurs de puissance au-delà de 40 ans. Afin d'établir un avis sur les programmes de recherche en cours dans ce domaine, et sur les orientations à leur donner, l'ASN a sollicité le support de son comité scientifique. La mission donnée a été cadrée par une fiche « Recherche » qui explicite les enjeux de sûreté, le contexte national et international.

Afin de répondre à cette demande, le comité Scientifique a mis en place, lors de sa réunion du 9 novembre 2018, un sous-comité et lui a donné pour mission d'élaborer un projet d'avis sur les programmes de recherche en cours et sur les ajustements ou compléments qui seraient à engager afin de pouvoir disposer de manière anticipée des connaissances sur le vieillissement des matériaux non-métalliques pour poursuivre le fonctionnement des réacteurs de puissance, ainsi que des autres installations nucléaires et du cycle, au-delà de la durée initiale de fonctionnement retenue à leur conception.

Ce sous-comité est constitué de trois membres du comité : Benoît De Boeck, Jean-Marc Cavedon, Jean-Claude Micaelli.

Afin de prendre connaissance des programmes de recherche sur le sujet menés en France, le sous-comité « vieillissement des matériaux non métalliques » a défini, en lien avec la Mission Expertise et Animation (MEA) de l'ASN, une liste d'organismes à rencontrer : EDF, l'IRSN, le CEA et l'UGE (*Université Gustave Eiffel*).

2/ Point sur les rencontres avec CEA, EDF, UGE et IRSN

Du fait, notamment, du contexte sanitaire lié à l'épidémie de COVID-19, plus de 2 années ont été nécessaires à l'organisation de l'ensemble des réunions. La dernière réunion organisée dans le cadre de cette mission a eu lieu le 8 janvier 2021 avec l'IRSN.

2.1/ Rencontres avec le CEA

Cette rencontre s'est tenue le 10 octobre 2019 à Saclay, en présence des équipes de recherches rattachées au programme « Réacteurs de 2^{ème} et 3^{ème} générations » du CEA et du chef de programme.

Ce programme contient explicitement un axe de recherche « Durée de fonctionnement ». Les recherches portées par cet axe sont menées en soutien au parc électronucléaire, principalement sur sollicitations d'EDF, à l'exception d'un projet de recherche amont, mené en propre et consacré à la modélisation multi-échelle (*Projet RMATE*).

Actuellement, l'axe « Durée de fonctionnement » porte l'essentiel de son effort sur les matériaux métalliques, les travaux relatifs aux matériaux non métalliques sont quant à eux comparativement d'ampleur plus modeste.

a) Matériaux métalliques

Ce domaine, ayant fait l'objet de recommandations par l'ASN en 2012, sort du cadre de la mission du sous-comité, et les activités présentées ne seront que brièvement décrites.

Les activités de recherche sont pour l'essentiel menées dans le cadre de l'Institut tripartite (I3P) associant le CEA, EDF et Framatome sous l'appellation DDFCI (*Durée de Fonctionnement Cuve et Interne de Cuve*), elles s'inscrivent dans le cadre du soutien apporté par le CEA à EDF dans la perspective d'extension de la durée d'exploitation des réacteurs de type 900 et 1300 MW. Plusieurs exemples de recherches ont été présentés, dont notamment le programme GONDOLE dédié au gonflement des structures internes de la cuve. Ces recherches ont bénéficié du développement de modélisations multi-échelle mises au point dans le cadre du projet RMATE.

La présentation de ces recherches a illustré un savoir-faire maîtrisé, tant expérimental que théorique, combinant modélisations multi-échelle et expérimentations en pile (*réalisées notamment dans le réacteur OSIRIS*) et en laboratoires chauds.

b) Matériaux non métalliques

Polymères

Dans le cadre du projet européen TEAM-Cables qui est piloté par EDF, le CEA, partenaire du projet, n'est impliqué que dans des travaux de simulation multi-échelle, avec pour objet la compréhension des mécanismes de vieillissement des isolants en polymère. Ces travaux bénéficient des méthodes développées pour les matériaux métalliques évoquées ci-dessus.

Béton

Pour ce qui concerne le vieillissement des bétons, plusieurs problématiques font l'objet de travaux de recherche et de développement au CEA, elles peuvent être regroupées comme suit :

- La corrosion des armatures avec pour champ d'application principal l'aval du cycle (*structures d'entreposage*). Ces travaux sont notamment valorisés dans le cadre du projet ANR DECIMAL (*DEscription phénoMénologique de la Corrosion et son Impact sur la durabilité d'enrobés de déchets MAgnésiens dans des Liants hydrauliques*) en cours et piloté par l'Andra. Ils font aussi l'objet d'une valorisation dans le cadre du projet européen ACES dédié au vieillissement des enceintes de confinement,
- Le comportement hydrique des bétons, le fluage et la fissuration dont les travaux bénéficient des résultats du programme expérimental VERCORS (*Vérification Réaliste du Confinement des Réacteurs - voir §2.2*) et donnent lieu à des modélisations et des simulations numériques dont l'ampleur actuelle est apparue limitée.

Globalement, les ressources actuellement mobilisées par le CEA sur le vieillissement des matériaux non métalliques sont relativement limitées, et majoritairement consacrées à l'aval du cycle dans le cadre de partenariats avec notamment l'Andra.

2.2/ Rencontre avec EDF

La rencontre s'est tenue sur 2 journées en présence notamment du délégué programme « Durée de Fonctionnement », du délégué coordination du domaine nucléaire, du directeur des programmes ingénierie et du responsable programme « Durée de Fonctionnement » :

- Le 24 juin 2020, à EDF Les Renardières : présentation du programme de R&D dédié au vieillissement des polymères et visite des installations expérimentales dédiées à l'étude du vieillissement des matériaux non métalliques, dont les polymères et le béton.
- Le 16 septembre 2020, réunion accueillie par l'ASN à Montrouge : présentation des programmes relatifs au Génie Civil.

a) Polymères

Les travaux de R&D ont actuellement pour cibles privilégiées deux types d'objets : les câbles électriques et les tuyauteries enterrées à base de PEHD¹. Pour ce qui concerne le revêtement polymère des enceintes de confinement, EDF ne mène pas à ce jour de travaux de R&D et s'inscrit dans une stratégie de détection/réparation des défauts locaux.

Vieillessement des câbles électriques.

Les activités de R&D d'EDF sont structurées par les programmes CAIMAN (1, 2 et 3), qui couvrent le vieillissement des câbles, des connecteurs et des traversées.

Ces programmes ont pour base des expérimentations menées dans les laboratoires d'EDF avec soit des échantillons prélevés sur sites, soit sur des échantillons vieillis artificiellement (*irradiations soustraitées*). L'analyse des résultats et le développement de modèles prennent notamment appui sur des approches multi-échelle, qui bénéficient d'un savoir-faire acquis dans le cadre des travaux sur le vieillissement des matériaux métalliques.

La plupart de ces travaux font l'objet de collaborations internationales menées dans différents cadres. On peut notamment citer le cadre européen Euratom avec le projet TEAM-Cables (*lancé fin 2017, piloté par EDF et impliquant notamment l'IRSN et le CEA*) et le cadre MAI (*Materials Ageing Institute, centre d'excellence sur le vieillissement des matériaux des centrales nucléaires, impliquant une centaine de partenaires dont notamment Kansai -Japon-, l'EPRI -Etats Unis-, CGN -Chine-, REA -Russie et EDF Energy -Grande Bretagne-*).

De nombreux laboratoires universitaires ou instituts de recherche sont impliqués dans ces travaux de recherche. On peut en particulier citer le CEA, mentionné pour sa compétence en traitement du signal.

Au-delà des travaux visant à « mieux comprendre pour mieux prévoir », il convient de noter un effort particulier associé aux examens non destructifs avec le développement de méthodes innovantes.

Le calendrier des avancées et des perspectives peut être schématiquement présenté de la manière suivante :

- Acquis CAIMAN 2 (2017-2020)
 - Compréhension des mécanismes et premières modélisations de la cinétique de dégradation,
 - Identification de méthodes d'examens non destructives (*réflectométrie et RMN avec un brevet déposé en 2018*).
- Objectifs CAIMAN 3 (2021-2023)
 - Modélisation validée des cinétiques de dégradation,

¹ Polyéthylène haute densité

- Mise en œuvre industrielle de techniques d'examens ou contrôles non destructifs (END/CND).

b) Structures de génie civil

Les travaux engagés ont pour objectif annoncé la compréhension et la prévision du comportement des ouvrages de génie civil à 60 ans. Le programme de R&D dispose d'un outil expérimental majeur : VERCORS, maquette d'enceinte double paroi à échelle 1/3. Cette échelle permet d'atteindre des vitesses de séchage, et plus généralement des cinétiques d'évolution des propriétés directement liée au séchage, 9 fois plus rapides qu'à la pleine échelle.

Quatre axes de R&D ont été présentés :

- Étanchéité des enceintes en fonctionnement,
- Comportement des enceintes en situation accidentelle,
- Cinétique de corrosion,
- Calcul de structure en présence de gonflement interne.

Étanchéités des enceintes de confinements en fonctionnement normal

Les essais et les mesures réalisés sur l'installation expérimentale VERCORS sont utilisés pour mettre au point un outil de simulation numérique (appelé « jumeau numérique » de VERCORS) de l'évolution temporelle des propriétés des bétons utilisés pour les enceintes de confinement. La validation de cet outil est en cours, dans la perspective d'en faire un outil industriel.

Cet outil a déjà été utilisé pour proposer une stratégie optimale de revêtement de l'enceinte de la tranche Belleville 2, il sera amélioré pour une meilleure prédiction des fuites observées lors des épreuves de la 3^{ème} visite décennale de Belleville 1 et la 2^{ème} visite décennale de Civaux 1.

EDF prévoit par ailleurs de participer au programme COBRA (*CO*nfinement du *B*âtiment *R*éacteur en *s*ituation d'*A*ccident) de l'IRSN, qui consiste en des essais à caractère plus analytique, étudiant les fuites d'air et de vapeur, avec ou sans aérosols, à travers un bloc de béton représentatif du béton d'une enceinte (voir § 2.4).

Le programme VERCORS fait l'objet de nombreux partenariats nationaux et internationaux. On peut notamment citer :

- Trois benchmarks internationaux, dont un qui sera lancé prochainement,
- Deux projets RSNSR cofinancés par l'ANR : MACENA (*Maitrise du confinement d'une enceinte en accident*) et ENDE,
- Deux projets européens : TU1404 (*Towards the next generation of standards for service life of cement-based materials and structures*) dans le cadre Cost (*Coopération européenne en Science et Technologie*) et notamment ACES (*Évaluation améliorée des structures en béton des centrales nucléaires vieillissantes*) dans le cadre Euratom.

Le projet ACES a débuté en septembre 2020, pour une durée de 4 ans. Il est piloté par VTT (*Technical Research Centre of Finland Ltd*) et est caractérisé par une participation importante de la France représentée par EDF, l'IRSN et le CEA. Il recouvre toutes les thématiques d'intérêt relatives au vieillissement du béton des enceintes de confinement et en particulier sa surveillance.

En lien avec l'étude de l'évolution des propriétés du béton, plusieurs actions de R&D sont engagées visant à améliorer et/ou mettre au point des techniques de mesures ou contrôles non destructifs :

- Instrumentation par fibre optique pour accéder aux profils de déformation (*VERCORS constitue un site pilote pour la mise au point de cette technique*),
- Techniques acoustiques pour les mesures de teneurs en eau, de fissuration/nids de cailloux, délamination ou encore de détection de fuite.

La mise au point de ces techniques fait elle aussi l'objet de partenariats, avec des laboratoires universitaires, comme cela a été le cas avec le projet ENDE dans le cadre ANR RSNR ou encore avec des industriels dans le cadre du MAI (*EPRI*).

Comportement en situation accidentelle

Deux domaines d'investigations ont été présentés :

- La caractérisation physique des matériaux (*bétons et câbles*) sous l'effet de la température et de l'humidité,
- L'évolution de structure (*fissuration*) et les écoulements eau-vapeur.

Ces travaux sont menés en grande partie dans le cadre du projet européen ACES et du projet ANR-RSNR MACENA, ils font l'objet de plusieurs collaborations.

Cinétique de corrosion

Les mécanismes conduisant à la corrosion du ferrailage étant relativement bien connus, l'essentiel de l'effort de R&D est consacré à l'amélioration des techniques de détection et de suivi. Les travaux engagés il y a plus d'une quinzaine d'années visent à développer, dans le cadre de partenariats, des solutions innovantes, répondant mieux aux besoins. Les ouvrages de Génie Civil principalement concernés sont les tours de refroidissement et les conduites en béton, l'objectif est l'optimisation de leur maintenance préventive.

Pathologie du béton, gonflement interne (RAG et RSI)

Aucuns travaux relatifs à la phénoménologie même de la RAG (*Réaction Alkali Granulat*) et de la RSI (*Réaction Sulfatique Interne*), n'ont été présentés au sous-comité, mais uniquement des travaux visant à quantifier les effets du gonflement sur des bétons fortement ferrailés. Concernant le développement des pathologies du béton, les interlocuteurs ont précisé au sous-comité disposer à ce jour d'une base de données suffisante, fournie par le suivi des barrages hydroélectriques, pour ne pas vouloir engager de recherches supplémentaires. Cependant, EDF envisage de suivre au plus près les travaux engagés sur ce sujet et en particulier à l'IRSN (*programme ODOBA - Observatoire de la Durabilité des Ouvrages en Béton Armé, voir §2.4*), sans pour autant envisager de devenir partenaires du programme.

Par ailleurs, même si EDF ne mène pas en interne, au sein même de la Direction de la R&D, des travaux de recherche sur le gonflement interne du béton des enceintes de confinement, il en sous traite à l'Université Gustave Eiffel (*voir §2.3*), (*expérimentations commanditées par le CEIDRE de la Direction Production Ingénierie/Division Ingénierie Nucléaire*), et participe, notamment avec l'IRSN, au benchmark ASCET (*Assessment of Structures Subjected to Concrete Pathologies*) du CSNI (*OCDE/AEN*).

2.3/ Rencontre avec l'UGE (Université Gustave Eiffel)

La rencontre avec l'UGE a eu lieu le 17 septembre 2020 sur le Campus de Marne la Vallée. L'UGE ou, plus précisément, le département Matériaux et Structure (MAST, *ex-IFSTARR*) de l'UGE était représenté par le Directeur du MAST et le Directeur Adjoint R&D du MAST.

Cette rencontre a permis de prendre connaissance du vaste ensemble des champs de compétence du MAST, son savoir-faire et ses moyens expérimentaux. Les travaux menés couvrent le large champ des ouvrages de Génie Civil, quel que soit le secteur industriel concerné. Il a cependant été expliqué que c'est dans le secteur industriel du nucléaire, du fait d'une forte « tradition » de R&D, que les collaborations sont les plus intenses et les plus suivies.

Parmi les thèmes susceptibles d'application aux ouvrages nucléaires, nous retrouvons notamment :

- Le retrait/fluage des matériaux cimentaires, la fissuration du béton armé,
- La chimie des matériaux cimentaires (*en interne et aux interfaces avec d'autres milieux*),
- Le comportement des câbles (*relaxation, fatigue, corrosion, protection...*),
- L'instrumentation et la gestion des ouvrages,
- Les techniques innovantes de réparation,
- Le développement de matériaux à performances élevée (*Bétons Fibrés à Ultra-haute Performances, ...*),
- La déconstruction et le recyclage.

Pour chacun de ces thèmes, plusieurs exemples pointus d'interventions ou d'actions ont été cités (*partenariats industriels, brevets, expertises, thèses*).

Au-delà des thématiques, la visite des laboratoires a permis de prendre la dimension des capacités expérimentales dont dispose le MAST, combinant la capacité de réaliser tant des essais de grande échelle (*dalle d'essai de 600 m², presse, banc de fatigue...*) que des analyses pointues (*microscope électronique à balayage, analyseur à rayons X, analyse thermique différentielle et analyse thermogravimétrique couplées, ...*).

Le MAST, avec ses ressources (*128 permanents plus une quarantaine de thésards*), ses compétences et ses moyens expérimentaux, est apparu comme un acteur connu des « clients » de R&D du nucléaire et en particulier d'EDF, ORANO et de l'IRSN car très impliqué dans les projets que ces organismes pilotent ou soutiennent dans le domaine du vieillissement des ouvrages de Génie Civil.

2.4/ Rencontre avec l'IRSN

La rencontre a eu lieu de 8 janvier 2021, en présence notamment du responsable de l'axe programme vieillissement, de l'adjoint au directeur de la recherche en sûreté et partiellement du directeur de la recherche en sûreté.

a) polymères

Les travaux menés par l'IRSN concernent les câbles électriques, les peaux d'étanchéité des enceintes de confinement et les conduites en PEHD.

Câbles électriques

Les recherches visent à s'assurer du bien-fondé des critères et des justificatifs présentés par EDF dans leurs dossiers de sûreté. Associant expérimentations et modélisations, dont des approches multi-échelle, ces recherches s'inscrivent pour l'essentiel dans le cadre du projet européen TEAM-Cables

piloté par EDF et qui permet un assez large partage des connaissances sur le sujet. La contribution de l'IRSN porte sur la caractérisation des matériaux. Il est ressorti des discussions la difficulté de l'accès à des câbles vieilliss *in situ* (Ex : câbles de la tranche N°1 de Fessenheim en cours de démantèlement).

Peaux d'étanchéité

Les travaux ont pour objet les performances des peaux d'étanchéité des enceintes de réacteurs 1300 MWe, lors d'un accident grave. Il s'agit d'études expérimentales devant apporter des réponses à court terme. Il a été fait état, là aussi, d'approches multi-échelle, mais au regard de la complexité du sujet, elles n'ont pour seul objectif qu'une aide à la compréhension des phénomènes. Un programme expérimental sur des échantillons de grande dimension est en cours, mais des questions se posent quant à la représentativité des échantillons.

Tuyauteries en PEHD

Dans ce domaine l'IRSN n'a pas vraiment engagé de projet de recherche mais a effectué des études bibliographiques, visant à faire un point sur les connaissances actuelles au regard des faiblesses potentielles de ce type de tuyauterie. Des tuyauteries enterrées en PEHD ont été installées pour la source d'eau ultime dans le cadre du noyau dur post-Fukushima. Le PEHD est choisi pour ses très bonnes propriétés (*absence de corrosion et de « fouling »*), mais c'est un matériau relativement neuf et il est donc nécessaire d'étudier son comportement dans le temps.

Il apparaît que le retour d'expérience industriel sur ce matériau est plutôt positif et l'IRSN ne prévoit pas, à ce stade, d'engager de programme de recherche. L'IRSN a cependant souligné l'existence d'un besoin d'acquisition de connaissances sur les contrôles non destructifs des soudures et sur la tenue mécanique des tuyauteries en présence de défauts.

b) Génie Civil

L'IRSN contribue de longue date à l'acquisition de connaissances sur le comportement différé du béton et l'impact de ces évolutions sur l'étanchéité des enceintes de confinement, notamment en situation accidentelle.

Dans ce domaine, deux axes de recherche mobilisent l'essentiel des efforts :

- La quantification des fuites,
- Les pathologies du béton de type RAG et RSI.

Quantification des fuites

Pour ce qui concerne les fuites (*air, air-vapeur, avec ou sans aérosols*), les recherches font l'objet du programme expérimental COBRA mené sur la plateforme expérimentale MACUMBA de l'IRSN. Les essais sont réalisés sur des blocs de bétons représentatifs des bétons armés précontraints des enceintes de confinement (*épaisseur de l'ordre du mètre*). Le programme expérimental va permettre l'étude de l'influence d'un réseau de fissures issues d'un chargement cyclique (*séisme*), l'étude de l'influence d'un réseau de fissures en damier (*pathologies du béton*), et l'évaluation des performances de peaux composites. En parallèle, le volet modélisation va permettre (1) le développement et la validation d'un modèle mécanique de la maquette permettant d'évaluer le niveau de fissuration (*ouverture*), le comportement au jeune âge, etc. et (2) le développement et la validation d'un modèle permettant l'évaluation de fuites pour un chargement thermo-hydrrique et un niveau de dégradation donné (*couplage faible*). Le programme COBRA a pour objet de servir de base analytique au développement de modèles et à l'interprétation des essais du programme VERCORS. Il est à noter que l'IRSN a accès aux

résultats de ce programme, et que l'on retrouve sur ce sujet une collaboration IRSN-EDF puisque EDF participe au programme expérimental COBRA.

Pathologie du béton

Dans ce domaine l'IRSN a lancé un programme ambitieux, appelé ODOBA, et prévu sur une durée de 10 ans (2016-2026). Il consiste en essais de vieillissement sur des blocs en béton de grandes dimensions. Il fait, à ce jour, l'objet de partenariats avec : Bel V (*filiale de l'Agence Fédérale Belge de Contrôle Nucléaire*), le CNSC (*Canadian Nuclear Safety Commission*), l'US-NRC (*Nuclear Regulatory Commission des Etats-Unis*), VTT et la NSC (*Nuclear and radiation Safety Centre de Chine*). La RAG et la RSI en constituent les deux thèmes de recherche. Pour les analyser, une analyse multi-échelle et multi-physique est nécessaire, avec une approche complémentaire entre l'expérimentation et la modélisation. Ces recherches sont associées au développement et à la mise au point de méthodes de mesures ou de surveillance : mesure de déformation par fibre optique, détection de gonflements internes à l'aide de techniques acoustiques, électriques et électromagnétiques. Un programme expérimental « à large spectre » est en cours pour tester des méthodes innovantes des CND du béton avec des pathologies. Les résultats obtenus en laboratoire semblent prometteurs.

En parallèle, un consortium d'organismes de recherche académique, experts du comportement du béton, et dénommé CONCRETE, a été mis en place. Il associe l'IRSN, l'UGE et plusieurs autres laboratoires universitaires. Tel un réseau, ce consortium organise ses travaux et partage ses connaissances dans le domaine des pathologies du béton et sur les sujets connexes comme celui des mesures et examens non destructifs. Ces organismes experts ont notamment accès aux résultats du programme ODOBA et contribuent à sa définition et à l'analyse des résultats.

Vieillissement des bétons et stockage souterrain

L'IRSN a également présenté au sous-comité ses questionnements sur le comportement des bétons mis en œuvre dans le stockage souterrain Cigéo, ainsi que les différents axes de R&D dans lesquels s'est engagé son GTR (*Groupe Thématiques de Recherche*) Stockage Géologique. Certaines des questions bénéficieront selon l'IRSN des résultats du programme ODOBA. Cependant, ce point n'a pas été étudié par le sous-comité car il n'entre pas dans le cadre de sa mission.

2.5/Bilan du projet ENDE

Bien qu'ayant pour contributeurs EDF et l'UGE, ce projet de R&D, consacré aux END du béton, n'a pas été évoqué lors de nos rencontres avec ces deux organismes. Le sous-comité en charge de l'élaboration du présent avis a eu ultérieurement l'opportunité d'assister à une présentation du bilan de ce projet et a jugé important d'en faire état, et d'en prendre compte dans ses recommandations. Cette présentation a été organisée le 14 juin 2021 par l'UGE.

Le projet ENDE (*Evaluation Non Destructives des Enceintes de confinement des centrales nucléaires*) a été retenu dans le cadre de l'appel à projets "Recherche en sûreté nucléaire et en radioprotection" du programme Investissements d'Avenir cofinancé par l'ANR. Il a été mené de janvier 2014 à mai 2021 par un consortium associant 9 partenaires (*Université Aix Marseille, Université de Toulouse III -Paul Sabatier-, Centrale Lille Institut, CNRS Alpes -Grenoble-, EDF R&D -Clamart-, Mistras Group, Université de Bordeaux, Institut National Polytechnique Grenoble, Université Gustave Eiffel*). Ce projet a été consacré au développement et au test de méthodes non destructives de mesure de différents indicateurs de l'état d'un béton (*porosité, teneur en eau, module d'élasticité et résistance mécanique*) et de suivi du développement de fissures.

Sous la houlette de Vincent Garnier (*Université Aix Marseille / Ecole Centrale de Marseille, LMA*), coordonnateur ENDE, une dizaine de présentations ont illustré le bilan du projet. Le projet a permis de réelles avancées scientifiques en levant plusieurs verrous (*notamment pour le suivi du développement de fissures*), ainsi que la valorisation de plusieurs techniques sur site.

Il est notamment apparu important de pouvoir combiner les résultats de plusieurs types et techniques de mesures pour accéder à des informations utiles à l'évaluation des dégradations de la tenue mécanique et de l'étanchéité d'un béton, soulignant ainsi la dimension multidisciplinaire du sujet et, sur le plan organisationnel, l'intérêt d'associer plusieurs laboratoires dans un cadre structuré.

3/ Conclusions et recommandations

L'ensemble des informations collectées a permis au sous-comité de disposer d'une vue assez complète de la R&D engagée en France sur les principales questions de sûreté soulevées par le vieillissement des composants non métalliques et difficilement remplaçables, équipant les réacteurs de puissance en exploitation.

Ces travaux appellent les remarques ou constats suivants :

- Le sous-comité a pu accomplir sa mission d'information scientifique et technique sans que son rattachement à l'Autorité de sûreté (*et donc à une fonction première d'inspection réglementaire*) vienne interférer dans les relations. Les échanges ont été ouverts et productifs avec tous les interlocuteurs, l'accès aux résultats des travaux et aux locaux a été transparent, soutenu par des présentations de qualité. Les réponses à nos questions et demandes de précision ont été tout aussi transparentes.
- Le programme de R&D engagé par EDF est conséquent, et sous-tendu par deux préoccupations :
 - Compréhension, prédiction des mécanismes de vieillissement et de leurs conséquences,
 - Mise au point et amélioration de méthodes d'examens non destructifs.
- Le CEA, au regard de sa forte implication sur les matériaux métalliques, mène des travaux relatifs aux matériaux non métalliques qui sont comparativement d'ampleur plus modeste. .
- L'implication de l'IRSN est, quant à elle, caractérisée par :
 - Une présence sur les sujets à fort enjeux de sûreté,
 - Un effort particulièrement important sur les pathologies du béton.
- Globalement, les démarches de R&D apparaissent comme pertinentes et efficaces, avec un bon équilibre entre expérimentation et modélisation dont approches multi-échelle. Le bénéfice des travaux précurseurs menés sur les matériaux métalliques est à souligner et à mettre au crédit de la maturité croissante des approches par le calcul.
- Les problématiques majeures sont couvertes de manière adaptée et cohérente avec les enjeux et les calendriers.
- Les programmes sont généralement développés dans le cadre de partenariats multiples et font l'objet d'un partage à l'international notamment dans le cadre Euratom. A ce sujet on peut relever l'existence de très nombreux échanges entre TSO et exploitants.

- Tous les programmes tirent profit des compétences et moyens de la recherche académique française, dans le cadre de très nombreux partenariats.

Ainsi que les recommandations suivantes :

- L'ampleur, la qualité et la densité des partenariats entre acteurs nationaux et européens de la R&D sur le vieillissement des matériaux non métalliques constituent un réseau de recherche à maintenir et à préserver *a minima* au niveau actuel.
- Les examens et contrôles non destructifs, associés le cas échéant à un suivi en ligne, constituent en matière de sûreté une ligne de défense importante qui pourrait mériter un renforcement et une meilleure mutualisation des efforts, à l'instar de ce qui a été réalisé dans le cadre du projet RSNR ENDE. Cet effort pourrait être l'occasion de recherches visant plus particulièrement à s'intéresser aux contrôles et mesures à réaliser dans des zones d'accès difficile. Cette recommandation vise le lancement de projets fédérant efforts et compétences sur un axe central dédié aux contrôles non destructifs. Le cadre pourrait être national (*par exemple dans la continuité du projet ENDE, aujourd'hui arrivé à son terme*) et/ou international (*à ce jour ce thème de recherche n'a constitué, dans les projets internationaux, qu'un axe de travail secondaire ne mobilisant à chaque fois que peu de partenaires*).
- Le démantèlement du réacteur N°1 de Fessenheim permettra de disposer de matériaux (*notamment de câbles électriques*) ayant vieilli *in situ*. Le sous-comité estime que la récupération de ces matériaux pour l'analyse de leur vieillissement par les laboratoires impliqués dans ces recherches doit être encouragée et facilitée. Cette recommandation vaut pour tout autre type de matériaux et de matériels d'intérêt, au terme de leur utilisation dans une installation nucléaire.
- Compte tenu de ses échelles de temps, la recherche doit savoir anticiper les expressions de besoin. Il est cependant difficile d'engager des recherches spécifiques sur tous les nouveaux matériaux qui pourront équiper les installations nouvelles, en cours de construction ou de conception. Il apparaît donc important de poursuivre, voire d'accroître, les efforts engagés sur la modélisation multi-échelle. En effet, plus les connaissances acquises prennent appui sur une compréhension fine des phénomènes mis en jeu, plus aisée sera la transposition de ces connaissances, et des modèles associés, à de nouveaux matériaux. Cette recommandation vaut aussi pour une meilleure prise en compte des conditions de fabrication, de construction ou d'exploitation, y compris pour des matériaux connus, qui seraient susceptibles d'avoir un impact sur le vieillissement des matériaux non métalliques.

Cette enquête n'a pas mis en évidence de besoins spécifiques supplémentaires, ni de R&D pour des installations nucléaires autres que les réacteurs de puissance, à l'exception peut-être des installations devant être utilisées pour le stockage souterrain. Ce sujet pourrait le cas échéant faire l'objet d'un complément d'études et d'un avis.