

Consortium DEMAIN

Bilan de compétences et d'expertises pour le
secteur de l'assainissement et démantèlement
nucléaire

Version 2

Janvier 2023

Version Publique

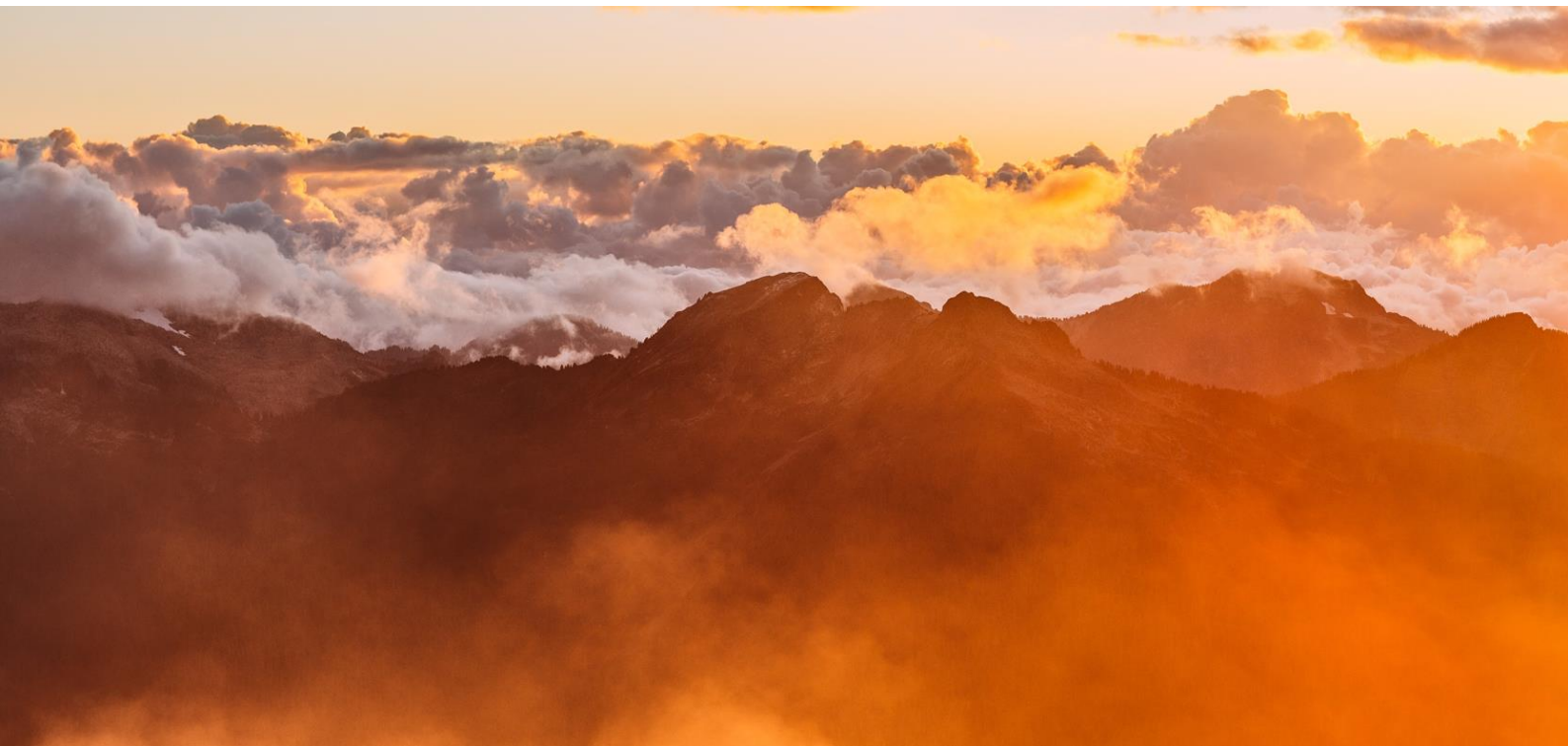


Table des matières

Acronymes.....	3
Introduction.....	5
Analyse des expertises par laboratoire.....	8
BPH - Bordeaux Public Health.....	8
BSE - Bordeaux Sciences Économiques	8
CED - Centre Émile Durkheim	9
CRPP - Centre de recherche Paul Pascal.....	9
EABX - Laboratoire Écosystèmes Aquatiques et Changements Globaux.....	10
EPOC - laboratoire d'Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux	10
I2M - Institut de Mécanique et d'Ingénierie	11
IRGO - L'Institut de Recherche en Gestion des Organisation.....	11
ISM - L'Institut des Sciences Moléculaires	12
LaBRI - Laboratoire Bordelais de Recherche en Informatique	12
LOMA - Laboratoire Ondes et Matière d'Aquitaine.....	13
LP2i - Laboratoire de Physique des 2 Infinis	13
XLIM.....	14
Résumé des compétences clefs par thématiques.....	15
LP2i (Physique nucléaire):.....	15
LP2i (Remédiation):	15
CRPP (Physico-Chimie):	15
ISM (Physico-Chimie):.....	15
I2M (Matériaux):	15
LaBRI (Robotique):	15
XLIM (Robotique):	15
LOMA (Ondes et Matière):	15
LP2i (Mesures & pollutions):.....	15
EPOC (Mesures & pollutions):.....	15
EABX (Mesures & pollutions):.....	15
BPH (Santé):	16
CED (Sciences Humaines et Sociales):	16
BSE (Sciences Économiques):.....	16
IRGO (Gestion des Organisation):	16
Exemples de mise en avant sur problématiques spécifiques	17
Suivi de l'évolution des colis de déchets dans un centre d'entreposage temporaire	17
Réduction des déchets secondaires lors des activités de décontamination.....	18
Préparation du dossier de démantèlement pour le décret de démantèlement.....	19
Promotion d'un modèle socio-économique national pour l'essor de l'A&D	20

Acronymes

A&D	Assainissement et démantèlement
AFNOR	Association française de normalisation
AIEA	Agence Internationale de l'Énergie Atomique
ASN	Autorité de Sûreté Nucléaire
BPH	Bordeaux Population Health
BSE	Bordeaux Sciences Économiques
NRBC	Arme nucléaire, radiologique, biologique et chimique
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives
CED	Centre Émile Durkheim pour les sciences politiques et la sociologie comparative
CEN	Comité européen de normalisation
CIFRE	Convention Industrielle de Formation par la Recherche
CNAM	Conservatoire National des Arts et Métiers
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
COFRAC	Comité français d'accréditation
CRPP	Centre de Recherche Paul Pascal
DREAL	Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement
EABX	Écosystèmes Aquatiques et changements globaux
EDF	Électricité de France
EPOC	Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux
I2M	Institut de mécanique et d'ingénierie
IA	Intelligence Artificielle
ICMCB	Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux
IFREMER	Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer
IMB	Institut de Mathématiques de Bordeaux

IMS	Laboratoire de l'intégration du matériau au système
INB	Installation nucléaire de base
INP	Institut National Polytechnique
INRAE	Institut national de la recherche agronomique
IRGO	Institut de Recherche en Gestion des Organisations
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
ISM	Institut des Sciences Moléculaires
LaBRI	Laboratoire Bordelais de Recherche en Informatique
LOMA	Laboratoire Ondes et Matière d'Aquitaine
LP2i	Laboratoire de Physique des 2 infinis
MTD	Meilleure technique disponible
PIAT	Prestations intellectuelles et assistance technique
RnR	Réacteur à neutrons rapides
RSE	Responsabilité Sociale des Entreprises
UMR	Unité Mixte de Recherche
UNGG	Uranium Naturel – Graphite Gaz
XLIM	Institut de recherche pluridisciplinaire photonique, informatique, mathématiques et électronique

Introduction

Crée en 2019, DEMAÏN est un consortium supporté par l'Université de Bordeaux composé de laboratoires de la région Nouvelle Aquitaine. L'objectif de cette nouvelle organisation est de rassembler un large champ de compétences académiques afin de supporter le domaine de l'assainissement et démantèlement (A&D) des installations nucléaires. À terme, le consortium DEMAÏN a pour vision de devenir un partenaire de référence académique pour tout industriel impliqué dans l'A&D.

Fort d'une vingtaine de laboratoires de l'Université de Bordeaux, du CNRS et de l'INRAE (principalement des UMRs), le consortium DEMAÏN est actuellement dans une phase de structuration, initiée par les actions suivantes :

- Revue de littérature ;
- Entretiens avec des industriels du nucléaire ;
- Entretiens avec des pôles de compétitivité et des associations œuvrant dans le secteur du nucléaire.

En prenant en compte la large palette de compétences au sein du consortium (Figure 1), DEMAÏN a le désir de se structurer afin de mettre en avant les compétences porteuses pour le nucléaire. L'objectif est de pouvoir répondre aux problématiques actuelles de l'industrie.

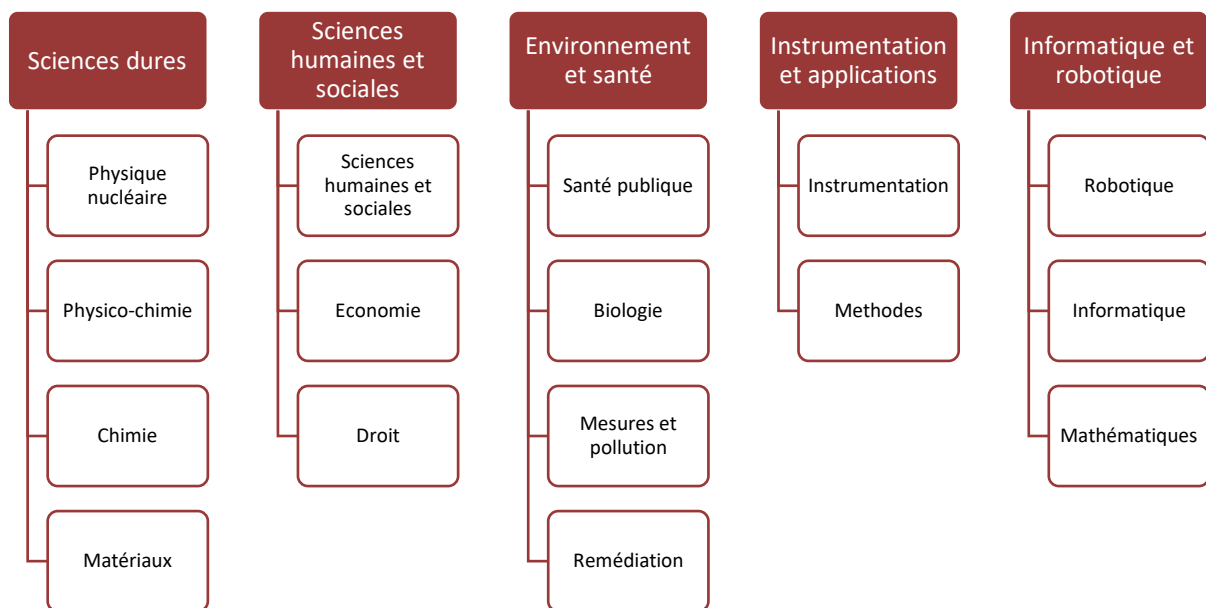


Figure 1 Compétences couvertes par le consortium DEMAÏN

Avec l'augmentation du volume du démantèlement du parc électronucléaire français, les problématiques techniques, réglementaires et socioéconomiques ne sont amenées qu'à se développer dans les années à venir.

Bien qu'embryonnaire, le démantèlement en France commence à se développer et couvrir différentes installations. Celles-ci ne sont pas uniquement d'anciens réacteurs électrogènes comme vu ci-dessous :

- Réacteurs électrogènes de première génération et seconde génération (UNGG, Fessenheim, Chooz A, etc.) ;

- Réacteurs de recherche et prototypes (Brennilis, Phénix, Superphénix, etc.) ;
- Installations de gestion de déchets (INB 37, INB 56, INB 72, INB 35 sur Cadarache, INB 72, INB 35 sur Saclay, etc.) ;
- Usines et ateliers pour le combustible (UP2-400 sur La Hague, UP1 sur Marcoule, silos d'entreposage, etc.) ;
- Installations de recherche (Triton, Néréide, Harmonie, etc.) ;
- Et d'autres installations du cycle du combustible et de la dissuasion.

Les défis sont nombreux et diffèrent de site en site. Par exemple, Brennilis (réacteur prototype à eau lourde) est ralenti dû à des contraintes réglementaires (problématique de gestion des déchets), les UNGG sont en attente de stratégie de démantèlement du fait de la complexité technique des scénarios de découpe du cœur (sous eau ou pas ?) alors que les réacteurs à neutrons rapides (RnR) ont la problématique de gestion du sodium.

En plus de ces problématiques techniques, il existe de nombreux autres risques tels que les considérations réglementaires sur le chemin critique de l'A&D, le besoin de développer des compétences car l'industrie est balbutiante mais aussi l'aspect social du fait de la gestion des déchets radioactifs ainsi que l'impact économique et social associé au déclassement des installations.

Un consortium tel que DEMAINE, présentant une variété de compétences et d'expertises, a définitivement un rôle à jouer dans le domaine du démantèlement nucléaire. Avec un positionnement clair, le consortium DEMAINE a réellement l'opportunité de se positionner en tant que référence académique pour le secteur du démantèlement nucléaire en France.

À cet effet, le cabinet de consultants et experts nucléaires Damona a été chargé d'analyser les différents domaines d'expertise des laboratoires impliqués dans le consortium DEMAINE et d'identifier les compétences qui pourraient répondre à court / moyen terme aux besoins de l'industrie de l'A&D.

Damona s'est ainsi entretenu avec les principaux laboratoires du consortium (à la demande du coordinateur du projet - Ludovic Mathieu – LP2i). Les compétences et expertises ont donc été analysées pour chacun des laboratoires, instituts ou unités de recherche suivante :

- **CED** : Centre Émile Durkheim pour les sciences politiques et la sociologie comparative ;
- **LP2i** : Laboratoire de Physique des 2 Infinis ;
- **CRPP** : Centre de Recherche Paul Pascal ;
- **EABX** : Écosystèmes Aquatiques et Changements Globaux ;
- **EPOC** : Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux ;
- **I2M** : Institut de Mécanique et d'Ingénierie ;
- **ISM** : Institut des Sciences Moléculaires ;
- **LaBRI** : Laboratoire Bordelais de Recherche en Informatique ;
- **XLIM** : Institut de recherche pluridisciplinaire photonique, informatique, mathématiques et électronique.

Suite à cette première phase d'étude, quatre autres laboratoires ont été ajoutés à l'analyse :

- **BPH** : Bordeaux Population Health ;
- **BSE** : Bordeaux Sciences Économiques ;
- **IRGO** : Institut de Recherche en Gestion des Organisations ;
- **LOMA** : Laboratoire Ondes et Matière d'Aquitaine.

Pour révéler le potentiel du consortium DEMAIN et mettre en avant les expertises et groupes porteurs, l'analyse des compétences de ces laboratoires a également été faite en corrélation avec des problématiques concrètes de l'industrie du démantèlement nucléaire. Ceci permet d'identifier des lots de compétences qui auraient le potentiel de mettre en exergue la capacité du consortium à soutenir le développement du secteur A&D français de façon spécifique.

Analyse des expertises par laboratoire

BPH - Bordeaux Public Health

<https://www.bordeaux-population-health.center/>

- Le **Bordeaux Public Health** (BPH) est un laboratoire de santé publique comptant une douzaine d'équipes concernées par le suivi à la santé, la nutrition et l'épidémiologie. Au sein du consortium DEMAINE, l'équipe EPICENE, en particulier, s'est engagée au sein du consortium DEMAINE pour mettre en avant son expertise en ergotoxicologie, une approche transdisciplinaire intégrant ergonomie, santé publique, toxicologie et droit dont le but est de contribuer à la prévention des expositions à des substances pouvant générer des cancers.
- Expérience forte dans le nucléaire français et notamment la structure organisationnelle d'EDF. De plus, le BPH a une réelle expérience sur le terrain. Ayant participé à de nombreux travaux en relation directe avec EDF, le CNAM ou l'IRSN (p. ex., analyse organisationnelle dans le cadre des arrêts de tranche sur le site de Gravelines, analyse fine des prises de dose, etc.), l'expertise du BPH est reconnue au niveau national ;
- Leur expérience du nucléaire et leur approche transdisciplinaire peut les rendre moteur du consortium DEMAINE mais aussi pour expliquer aux autres membres la réalité de l'industrie nucléaire.
- Axes d'intérêts potentiels : Analyse des risques et problématiques liées aux opérations de maintenance et démantèlement, développement de méthodologies basées sur un modèle participatif des équipes sur le terrain et des cadres, optimisation des conditions de travail, mise en place d'outils de planification et d'organisation mais aussi de dispositifs de sécurisation des opérations ;
- Exemples : Conception sur la phase d'intégration du centre de stockage CIGEO où la coactivité est une problématique forte, le démantèlement des réacteurs de puissance, analyses permettant de normaliser certaines activités terrain liées au démantèlement, identification des problématiques organisationnelles mais aussi physique de gestion des déchets.

BSE - Bordeaux Sciences Économiques

<https://www.bse.u-bordeaux.fr/>

- Le **Bordeaux Sciences Économiques** (BSE) est un laboratoire de quatre équipes de l'Université de Bordeaux qui couvre de nombreux sujets dont la macroéconomie et l'économie du développement. Dans le cadre du consortium DEMAINE, l'équipe d'intérêt est ISI – Innovation Science et Industrie. Ce groupe a pour thématique l'économie de la science et de l'innovation afin d'analyser comment les entreprises innovent ou intègrent des innovations.
- Sans expérience dans le nucléaire mais impliqué dans l'industrie de la défense, notamment aérospatiale, qui partage de nombreux parallèles avec le nucléaire, le BSE a la capacité d'analyser comment les entreprises innovent ou intègrent des innovations, d'identifier les mécanismes de blocage et les changements nécessaires (notamment grâce à leur plateforme VIA Inno). Cette analyse macro et micro de l'écosystème de l'innovation permet de cartographier les compétences ainsi que le rôle des politiques industrielles et publiques pour mettre en avant des recommandations pour l'innovation.
- Identification et analyse d'éléments innovants (ex. la digitalisation) impliquant une transformation industrielle ainsi que l'émergence de nouveaux acteurs et l'évolution de la cartographie des compétences ;

- Axes d'intérêts potentiels : Définition des politiques industrielles en partenariat avec des groupements nationaux tels que le GIFEN ou Nuclear Valley mais aussi au sein des donneurs d'ordres et sous-traitants de rang 1. Analyse des compétences et de l'efficacité de nouveaux modèles dus à des changements technologiques. Identification des leviers à activer pour favoriser l'innovation dans l'A&D. Mise en avant de politiques industrielles avec un focus sur l'innovation. Analyses quantitatives d'impact. Recommandations sur la mécanique des politiques publiques et industrielles pour encourager l'innovation ;
- Exemples : Influence de la digitalisation dans l'A&D, besoins d'innovations précis ainsi que leur impact sur le reste de la filière, identification des éléments bloquants pour le déploiement à grand échelle de systèmes robotiques pour l'A&D.

CED - Centre Émile Durkheim

<https://durkheim.u-bordeaux.fr/>

- Le Centre Émile Durkheim (CED) est un laboratoire concentré sur la sociologie avec un focus précis sur l'approche comparative des phénomènes sociaux et des impacts décisionnaires ou stratégiques, notamment sur les interactions de la sous-traitance et des compétences.
- Potentiel pouvant apporter de nouvelles perspectives à la compréhension, l'acceptation, la gouvernance et l'organisation du secteur et offrir des alternatives pour la résolution des défis à venir. Il sera nécessaire d'attendre au moins un an pour que le CED monte pleinement en compétence.
- Engager les groupements tels que le syndicat professionnel (GIFEN) ou le pôle de compétitivité (Nuclear Valley) pour évaluer les compétences de l'industrie, optimiser et structurer les besoins de la filière A&D, apportant ainsi une valeur ajoutée à la composante sociale du démantèlement nucléaire ;
- Axes d'intérêt potentiels : Identification des problématiques sociologiques, optimisation des performances, dynamiques organisationnelles, conseil dans l'assistance au changement, identification des contraintes (organisationnelles et économiques), feuille de route/stratégies, etc. ;
- Exemples : Enjeux du marché du démantèlement (par ex. impact du jumeau numérique), impact de la sous-traitance, effet des réorganisations, besoins en ressources pour tenir les engagements du démantèlement, processus sociaux et culturels influençant l'innovation technologique, étude des vulnérabilités lorsque les installations passent du statut opérationnel au statut de déclassement, étude des effets du démantèlement d'un équipement nucléaire et impact sur la performance, etc.

CRPP - Centre de recherche Paul Pascal

<https://www.crpp.cnrs.fr/en/home-page/>

- Le **Centre de recherche Paul Pascal** (CRPP) est une unité mixte CNRS / Université de Bordeaux et possède des compétences autour de la physique-chimie avec une spécialisation dans les matières molles (colloïdaux), les matériaux fonctionnels ou moléculaires ainsi que la biotechnologie.
- La capacité de mettre en avant des méthodes de séparation, de dépollution, décontamination, traitement de surface et traitement de déchets est un atout majeur. Le CRPP possède également de nombreux outils pour devenir un laboratoire de référence dans l'A&D nucléaire.

- Axes d'intérêt potentiel : Expertise en ingénierie colloïdale, mise au point de revêtements fonctionnels, mise en avant de ces approches avec l'avantage de minimiser l'émission de déchets secondaires, etc. ;
- Exemples : matériaux innovants, systèmes physico-chimiques changeant en fonction de variations (T°, champ électrique...), traitement des surfaces pour la prévention de la contamination fixe, traitement des surfaces pour la désorption de contamination, décontamination d'effluents par adsorption sur colloïdes, méthodes de séparation analytique, etc.

EABX - Laboratoire Écosystèmes Aquatiques et Changements Globaux

<https://www6.bordeaux-aquitaine.inrae.fr/eabx/EABX>

- Le **Laboratoire Écosystèmes Aquatiques et Changements Globaux (EABX)** s'intéresse aux milieux aquatiques environnementaux et aux différentes communautés végétales associées : phytoplanctons, bryophytes, macrophytes, nénufars, roseaux, etc. EABX analyse l'écologie de ces organismes sous l'impact de stress extérieurs et installe aussi des marqueurs pour suivre la pollution de ces milieux. EABX possède les compétences nécessaires pour l'analyse des problématiques, l'échantillonnage ainsi que l'analyse et l'identification des espèces. Ceci leur permet l'étude des conséquences écologiques face aux changements environnementaux. Cette unité de recherche en écologie aquatique dispose également de compétences en modélisation, en écotoxicologie et en chimie de l'environnement. Il est important de noter qu'EABX ne travaille pas dans le domaine de la bioremédiation.
- L'expertise et la capacité du laboratoire EABX à développer et implémenter des outils et méthodes permettant d'identifier l'impact environnemental du démantèlement ou d'études (environnementales ou sociétales) dans une optique de restauration ou d'optimisation des procédés de démantèlement.
- Axes d'intérêt potentiels : laboratoire environnemental, analyse des données écologiques et modélisation des processus, écologie des organismes sous l'impact de stress extérieur, analyse des problématiques et des indicateurs biologiques de pollution/stress, étude des conséquences écologiques face aux changements environnementaux liés à la présence du nucléaire, etc. ;
- Exemples : influence des facteurs globaux et locaux sur la biodiversité, développement d'indicateurs biologiques du démantèlement, dynamique d'apparition de blooms ou biofilms (colmatage des grilles d'arrivée d'eau), modélisation sur le rôle de l'énergie nucléaire dans l'atténuation des changements climatiques, etc. ;

EPOC - laboratoire d'Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux

<https://www.epoc.u-bordeaux.fr/>

- Le **laboratoire d'Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux (EPOC)** est un laboratoire interdisciplinaire environnemental spécialisé dans l'écotoxicologie, la biogéochimie et l'interface terrestre / aquatique. Avec des thématiques de recherche centrées autour de l'écotoxicologie et la chimie de l'environnement, l'océanographie côtière et les géosciences marines, EPOC vise principalement à étudier le fonctionnement ou le dysfonctionnement des écosystèmes des milieux aquatiques (eau douce, du littoral et de pleine mer).
- Les capacités d'EPOC à développer des méthodes d'évaluation, de surveillance et de prévision ainsi que son unicité sur le suivi des métaux rares et la précision des résultats sont clés.
- Avec de nombreux instruments et plateformes techniques à disposition, EPOC peut, par exemple, analyser le comportement géochimique des métaux traces et ultra-traces, une

compétence assez rare dans le paysage académique français. Cependant, un travail doit être réalisé pour montrer aux acteurs nucléaires extérieurs qu'EPOC n'est pas qu'un laboratoire d'analyses et que ses compétences s'étendent bien au-delà.

- Axes d'intérêt potentiels : optimisation de plans de remédiation, modèles de dispersion, études d'impact environnemental, cinétique d'extraction/séparation/désorption, développement de méthodes analytiques, etc. ;
- Exemples : propagation d'éléments métalliques non radioactifs générés par les activités de démantèlement, optimisation des plans de démantèlement par rapport aux études d'impact environnementales, étude de la contamination liées à la dispersion lors de transfert de boues/effluents, dispersion de contamination en milieu côtier, développement de nouvelles méthodes d'analyse ou de traçage, utilisation de proxy (isotope stable des éléments radioactifs à analyser) pour traçage, etc.

I2M - Institut de Mécanique et d'Ingénierie

<https://www.i2m.u-bordeaux.fr/>

- **L'Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M)** s'intéresse à la science mécanique dans son ensemble. Comprenant les études de génie civil et environnemental (bâti et infrastructure), l'I2M possède les compétences et outils nécessaires à la compréhension et la modélisation multi-échelle des phénomènes physiques mis en jeu dans les processus d'endommagement en fonction des contraintes mécaniques et environnementales complexes.
- L'I2M ayant certaines connaissances des contraintes du secteur nucléaire à travers EDF (contrat de recherche et d'expertise depuis 2010 pour l'évaluation de structures bétonnées), il possède certainement les outils et expertises nécessaires pour la compréhension et la modélisation de systèmes complexes présentant de fortes variabilités spatiales.
- Axes d'intérêt potentiels : évaluation des ouvrages maçonnés, détection des défauts de joints, étude des phénomènes physiques associés à l'endommagement, problématiques du comportement des structures en maçonneries ou en pierre, etc. ;
- Exemples : problématique de diffusion des matériaux poreux, dégradation des matériaux tels que ceux à base de plutonium (étudier les propriétés du plutonium pour éclairer les décisions futures sur la gestion du stock), du graphite (problématique du stockage du graphite ayant été exposé à des charges thermiques élevées), élaboration de nouveaux codes et normes pour les combustibles ou les colis de déchets, mise au point de combustibles tolérants aux accidents pour les nouvelles centrales, méthodes de fabrication novatrices, etc.

IRGO - L'Institut de Recherche en Gestion des Organisation

<https://www.irgo.fr>

- **L'Institut de Recherche en Gestion des Organisation (IRGO)** est un laboratoire réunissant les équipes de recherche spécialisées en Sciences de Gestion de l'université de Bordeaux. Ce laboratoire regroupe des équipes de recherche (Comptabilité et contrôle audit, Entrepreneuriat, Entreprises Familiales, Management bancaire et financier, Marketing, Ressources Humaines) autour de 3 thématiques : le RSE, le digital et le vin.
- IRGO a des compétences fortes sur les mécanismes de gestion des organisations d'un point de vue ressources humaines. A travers les questionnaires qu'ils conçoivent notamment, ils ont la capacité de pouvoir identifier les leviers à considérer sur certaines thématiques pour qu'une entreprise puisse s'adapter et atteindre ses objectifs ;
- Axes d'intérêt potentiels : amélioration de l'image de marque de l'A&D, identification des facteurs permettant d'attirer des profils dans ce secteur, augmentation de la rétention des collaborateurs, de la fidélisation des salariés, IRGO se concentre sur le bien-être du personnel au sens large, développement et bien être des employés sur le long terme ;

- Exemples : Problématique du recrutement au sein du nucléaire et de l'A&D. Développement de questionnaires pour le recrutement. Interactions avec les étudiants d'écoles d'ingénieurs du nucléaire (par exemple, IMT Atlantique, l'INSTN, ENSICAEN, le CNAM, etc.).

ISM - L'Institut des Sciences Moléculaires

<https://www.ism.u-bordeaux.fr/>

-
- **L'Institut des Sciences Moléculaires (ISM)** est une unité mixte de recherche CNRS / Université de Bordeaux / Bordeaux INP Aquitaine avec une compétence très forte en instrumentation, dont la spectroscopie. De façon générale, le laboratoire a comme axes de recherche la synthèse organique, la chimie théorique et l'expérimentation physicochimique (spectroscopie, photochimie, reconnaissance moléculaire et analyse). Le groupe représenté ici est GSM et compose l'un des groupes de recherche les plus importants dans le domaine de la spectroscopie vibratoire en France. GSM regroupe les compétences en rayonnements dont le développement d'instrumentations spectroscopiques pour l'étude de matériaux, d'interfaces, de nanomatériaux et de molécules. À noter que ces instruments sont souvent couplés à des approches théoriques faisant appel aux simulations numériques. L'ISM a par exemple récemment testé l'utilisation d'un dispositif innovant utilisant des pinces acoustiques pour la manipulation sélective de particules de poussière, ouvrant ainsi la voie au développement d'une nouvelle approche analytique pour le domaine de la physico-chimie atmosphérique.
- ISM (notamment le groupe GSM) a des compétences techniques très fortes et multidisciplinaires. Certaines de celles-ci sont porteuses pour l'A&D nucléaire (étude de propagation de radionucléides). Leur plateforme technique regroupant une vingtaine de spectromètres est un véritable centre d'expertise unique en France ;
- Sachant que l'ISM collabore déjà depuis plusieurs années avec l'IRSN, le laboratoire a les codes de l'industrie nucléaire, ce qui permettrait de mettre facilement en avant leurs services auprès d'autres entités que l'IRSN. La pluridisciplinarité des compétences de l'ISM permet de proposer une offre concrète qui intéresse les industriels et qui peut être immédiatement mise en avant.
- Axes d'intérêt potentiels : plateforme de spectrométrie (unique à l'échelle nationale et européenne), spectrométrie moléculaire, physico-chimie, spectroscopie et étude des aérosols, spectroscopie optique et neutronique dans les milieux naturels, processus physico-chimiques à l'échelle microscopique, composés organiques / inorganiques, etc. ;
- Exemples : Développement d'instruments de caractérisation, contribution aux travaux sur les verres pour le stockage des déchets à Haute Activité à Vie Longue, caractérisation en temps réel de poussières (non radioactives) ou d'amiante dans l'air, propriétés de capture sélective des verres, problématique de diffusion des radionucléides dans des matériaux poreux (migration d'espèces ioniques, gazeuses), etc.

LaBRI - Laboratoire Bordelais de Recherche en Informatique

<https://www.labri.fr/>

- Le **Laboratoire Bordelais de Recherche en Informatique (LaBRI)** est un laboratoire de robotique mais aussi d'informatique capable de développer entièrement toute la chaîne d'acquisition de données, que cela soit le hardware, le software, du capteur jusqu'à la plateforme robotique. La recherche menée au LaBRI est aussi bien fondamentale qu'appliquée.
- Au-delà de la capacité du LaBRI à développer des plateformes robotiques, les compétences les plus porteuses et différenciatrices du LaBRI sont leur capacité à développer des systèmes totalement cyber-sécurisés, dont les méthodes formelles, ou leurs travaux sur les systèmes

de navigation autonome offrant une assistance IA robuste pour le milieu nucléaire (même si ce dernier ne pourrait être autorisé à court terme sur ces sites dits sensibles, il reste un sujet très porteur). Le LaBRI, en tant qu'intégrateur de technologies, peut très rapidement proposer ses compétences et briques technologiques aux industriels de l'A&D nucléaire.

- Axes d'intérêt potentiels : robotique, intégrateur de technologies, plateforme robotique/cobotique, cyber-résilience, plateforme autonomes/IA, etc. ;
- Exemples : Interactions homme-robot, inspection à distance, manipulation à distance, etc. Une solution robotique peut probablement être mise en avant pour la plupart des problématiques.

LOMA - Laboratoire Ondes et Matière d'Aquitaine

<https://www.loma.cnrs.fr>

- Le **Laboratoire Ondes et Matière d'Aquitaine** (LOMA) est un laboratoire regroupant une centaine de personnes dont 40 chercheurs qui se concentrent sur trois axes centrés autour de trois équipes : photonique et matériaux ; matière molle et biophysique ; théorie de la matière condensée.
- L'équipe du LOMA impliquée sur le consortium DEMAIN apporte une grande expertise en spectroscopie et imagerie térahertz. Se concentrant sur le développement des techniques térahertz, le LOMA cherche à développer de nouveaux outils technologiques innovants pour la métrologie.
- Les ondes térahertz permettent de découvrir les propriétés spectroscopiques des matériaux en temps réel. Néanmoins, cela ne marche que pour les matériaux non-conducteurs et non-polaires. L'utilisation de la technologie térahertz pourrait donc s'appliquer à l'analyse de béton et ciment ainsi qu'à la reconstruction 3D de leurs propriétés. Ceci n'a jamais été essayé dans l'A&D et, si une cartographie des contaminations des bétons est faisable, il serait nécessaire de préétablir les signatures spectrales des radionucléides d'intérêt pour pouvoir aller de l'avant ;
- Axes d'intérêt potentiels : l'imagerie térahertz appliquée au contrôle non-destructif industriel pour l'A&D. Caractérisation des structures, des déchets types plastiques, cartons, etc., analyse in-situ ;
- Exemples : Structures de piscines de combustible, centres de stockage, colis de déchets MAVL en béton, analyse de la propagation des radionucléides.

LP2i - Laboratoire de Physique des 2 Infinis

<https://www.lp2ib.in2p3.fr/>

- Le **Laboratoire de Physique des 2 Infinis** (LP2i) est une unité mixte de recherche du CNRS-IN2P3 et de l'Université de Bordeaux (UMR 5797). Au sein du LP2i, physiciens et chimistes collaborent pour développer des projets de recherche autour de trois pôles : Astro-neutrino, Nucléaire et Santé-environnement. En support à ses projets d'innovation, le LP2i s'appuie sur différents services techniques spécialisés en mécanique, électronique, instrumentation et informatique. Le LP2i a également une connaissance assez détaillée du secteur nucléaire de part ces relations avec certains acteurs du secteur.
- Réelles compétences techniques dans le nucléaire, et ce à travers des plateformes d'irradiation et des équipements tels que des spectromètres à gaz rare et l'accès à des salles expérimentales en cours de construction où ils auront l'autorisation de manipuler des sources radioactives non-scellées ;
- Axes d'intérêt potentiels : stratégies de bio-décontamination, traitement des déchets liquides, détecteurs radiométriques, mise en « partage » des plateformes spectrométrie traces/ultra-traces...

- Exemples : décontamination des entrepôts de stockage des déchets radioactifs historiques (beta/gamma ou alpha), bio-décontamination NRBC (Nucléaire, Radiologique, Biologique, Chimique), bio-décontamination des structures en béton/ciment ou briques, étude des effets microbiens et des risques associés lors de l'entreposage des déchets en colis (par ex. génération d'hydrogène, corrosion), traitement de certains types de déchets liquides de faibles volumes, contrôle des biofilms ou blooms phytoplanctoniques, conception de détecteurs radiométriques innovants, etc.

XLIM

<https://www.xlim.fr/>

- XLIM est un laboratoire de robotique spécialisé dans les outils permettant l'évolution de porteurs robotiques dans des milieux extrêmes, inconnus ou dégradés. Leur spécialisation est réellement concentrée sur les systèmes de détection permettant l'évolution dans ces milieux.
- La compétence porteuse de XLIM est certainement leur capacité à concevoir des briques technologiques permettant au système d'évoluer dans un milieu inconnu. De ce fait, XLIM est un candidat parfait pour les sous-traitants faisant de l'intégration robotique, ce qui leur permettrait d'optimiser leurs coûts de développement en utilisant des briques technologiques conçues par XLIM. De plus, le laboratoire s'articule déjà autour de contraintes similaires (aérospatial) et donc ne nécessite pas une grande adaptation pour le nucléaire. XLIM pourrait ainsi très rapidement proposer ses compétences et briques technologiques aux industriels de l'A&D nucléaire.
- Axes d'intérêt potentiels : Robotique, perception et systèmes autonomes, multi drones, cobotique, systèmes hétérogènes (aérien / terrestre) autonomes avec carte collaborative, détecteur photonique, data fusion, jumeaux numériques, etc. ;
- Exemples : logiciel de cartographie 3D en temps réel, système de détection permettant la reconnaissance de déformations ou de changements sur colis de déchets, système de vision autonome avec reconnaissance de formes (machine learning) pour l'identification d'objets à risques dans des milieux complexes (par ex. boîte à gants), système de vision et de positionnement permettant la cartographie interne des tuyauteries, etc.

Résumé des compétences clefs par thématiques

LP2i (Physique nucléaire) : Mesures de données nucléaires, simulation de transport de particules et de faisceaux d'ions, mesures de basse radioactivité, conception de détecteurs innovants gamma, beta, neutron, etc.

LP2i (Remédiation) : Interactions micro-organismes/radioéléments, bioremédiation, isolement, identification et caractérisation de souches bactériennes en milieux contaminés, etc.

CRPP (Physico-Chimie) : Expertise en ingénierie colloïdale, mise au point de revêtements fonctionnels, mise en avant de ces approches avec l'avantage de minimiser l'émission de déchets secondaires, formulation de solutions/dispersions de nanoparticules, polyélectrolytes, tensioactifs, etc.

ISM (Physico-Chimie) : Plateforme de spectrométrie (unique à l'échelle nationale et européenne), spectrométrie moléculaire, physico-chimie, spectroscopie et étude des aérosols, caractérisation des poussières, spectroscopie optique et neutronique dans les milieux naturels, processus physico-chimiques à l'échelle microscopique, composés organiques/inorganiques, matériaux extractant de cations radioactifs en milieu aqueux, techniques de spéciation et dosage, etc.

I2M (Matériaux) : Evaluation nondestructive des ouvrages maçonnés, détection des défauts et hétérogénéités, étude des phénomènes physiques associés à l'endommagement, problématiques du comportement des structures en maçonneries ou en pierre, simulation numérique des mesures, etc.

LaBRI (Robotique) : Intégrateur de technologies, plateforme robotique/cobotique, cyber résilience, plateforme autonomes/IA, fusion de données, path-planning, jumeaux numériques, etc.

XLIM (Robotique) : Perception et systèmes autonomes, multi-drones, cobotique, systèmes hétérogènes (aérien/terrestre) autonome avec carte collaborative, localisation et cartographie dans des environnements complexes, planification autonome de trajectoires et de mouvements dans des environnements contraints, détecteur photonique, data fusion, jumeaux numériques, etc.

LOMA (Ondes et Matière) : Photonique et matériaux, matière molle et biophysique, théorie de la matière condensée, spectroscopie et imagerie térahertz, caractérisation et analyse in-situ, etc.

LP2i (Mesures & pollutions) : Stratégies de bio-décontamination, traitement des déchets liquides, détecteurs radiométriques, mise en « partage » des plateformes spectrométrie traces/ultra-traces, mesures de basse radioactivité, etc.

EPOC (Mesures & pollutions) : Optimisation de plans de remédiation, modèles de dispersion, études d'impact environnemental, cinétique d'extraction/séparation/désorption, développement de méthodes analytiques, transport et réactivité des éléments (ultra-)traces métalliques dans les systèmes aquatiques à l'interface continent-océan, Analyse des éléments (ultra-)trace métalliques (traceurs géochimiques, contaminants classiques et émergents) dans les matrices environnementales complexes, etc.

EABX (Mesures & pollutions) : Laboratoire chimie environnemental, analyse des données écologiques et modélisation des processus, écologie des organismes sous l'impact de stress extérieur, analyse des problématiques et des indicateurs biologiques de pollution/stress, étude des conséquences écologiques face aux changements environnementaux liés à la présence du nucléaire, etc.

BPH (Santé) : Expertise en ergotoxicologie (intégrant ergonomie, santé publique, toxicologie et droit), analyse des risques et identification des problématiques opérationnelles ou organisationnelles, développement de méthodologies, optimisation des conditions des travail, mise en place d'outils de planification et d'organisation, dispositifs de sécurisation des opérations, etc.

CED (Sciences Humaines et Sociales) : Identification des problématiques sociologiques, optimisation des performances, dynamique organisationnelle, conseil dans l'assistance au changement, identification des contraintes (organisationnelles et économiques), feuilles de route/stratégies, etc.

BSE (Sciences Économiques) : Macroéconomie, économie du développement, économie de la science et de l'innovation, identification des mécanismes de blocage, cartographie des compétences et évolution lors de transformation industrielle dus à des changements technologiques, analyses quantitatives d'impact, mise en avant de politiques industrielles, etc.

IRGO (Gestion des Organisation) : Etude des mécanismes de gestion des organisations d'un point de vue ressources humaines, identification des facteurs à considérer sur certaines thématiques pour qu'une entreprise puisse s'adapter et atteindre ses objectifs, etc.

Exemples de mise en avant sur problématiques spécifiques

Après avoir établi les compétences et expertises respectives des laboratoires du consortium DEMAIN, les problématiques mises en avant ci-dessous donnent des exemples potentiels de collaboration entre les laboratoires présentés dans ce document. Étant donné le nombre et la diversité des problématiques de l'A&D, les exemples ci-dessous forment une liste non-exhaustive des possibilités du consortium DEMAIN.

Suivi de l'évolution des colis de déchets dans un centre d'entreposage temporaire

Bien que la construction du projet CIGEO (centre de stockage définitif en profondeur pour les déchets de haute activité et de moyenne activité) commence dans les années qui viennent, le centre sera ouvert pour remplissage au moins jusqu'en 2100.

Entre temps, il est nécessaire d'entreposer en surface ces déchets (généralement dans des colis bétonnés) et de suivre les différents paramètres associés. Au cours du temps, il existe un risque non-négligeable que ces colis de déchets s'abîment, que cela soit par l'office du temps mais aussi en cas d'incident.

À cet effet et pour connaître exactement les conditions des colis lors du transfert du centre d'entreposage de surface temporaire au centre de stockage définitif en profondeur, le propriétaire doit effectuer un suivi des colis de déchets. Généralement, il n'est pas possible d'envoyer un opérateur du fait du haut débit de dose, de la chaleur et de l'encombrement.

Actuellement, les propriétaires de déchets peuvent être à la recherche de solutions technologiques pouvant :

- Indiquer les conditions des colis de déchets après une longue période de stockage ;
- Indiquer les conditions des déchets au sein des colis de stockage ;
- Réduire la prise de dose des opérateurs à travers des systèmes de suivi à distance ;
- Offrir un système permettant de prédire la dégradation des colis de déchets.



Figure 2 Exemple de colis de déchets entreposés- © Nuclear Waste Management Organization (NWMO), Canada

À cet effet, il est possible d'imaginer une solution semi-autonome permettant de se déplacer entre les différents colis pour faire de la prise de mesure afin de renseigner le propriétaire des déchets.

Du point de vue du consortium DEMAIN, plusieurs laboratoires clés peuvent être impliqués, tous avec des compétences précises, répondant à la problématique.

L'organisation proposée serait :

- Le **LaBRI** pour développer le porteur robotique permettant d'évoluer au sein du centre d'entreposage en surface ;
- Le **XLIM** pour mettre en avant des compétences autorisant le porteur d'évoluer dans un milieu inconnu et géométriquement complexe – donc toute la partie capture de données géospatiales ;
- L'**ISM** pour mettre en avant le développement d'instruments permettant le suivi des conditions des colis de déchets et des déchets ;
- Le **LOMA** avec l'application du rayonnement térahertz afin de caractériser la structure béton des colis ;
- Le **LP2i** en support de l'ISM pour toute la partie développement d'instruments ;
- Et l'**I2M** pour apporter une expertise dans la structure des bétons des colis.

Réduction des déchets secondaires lors des activités de décontamination

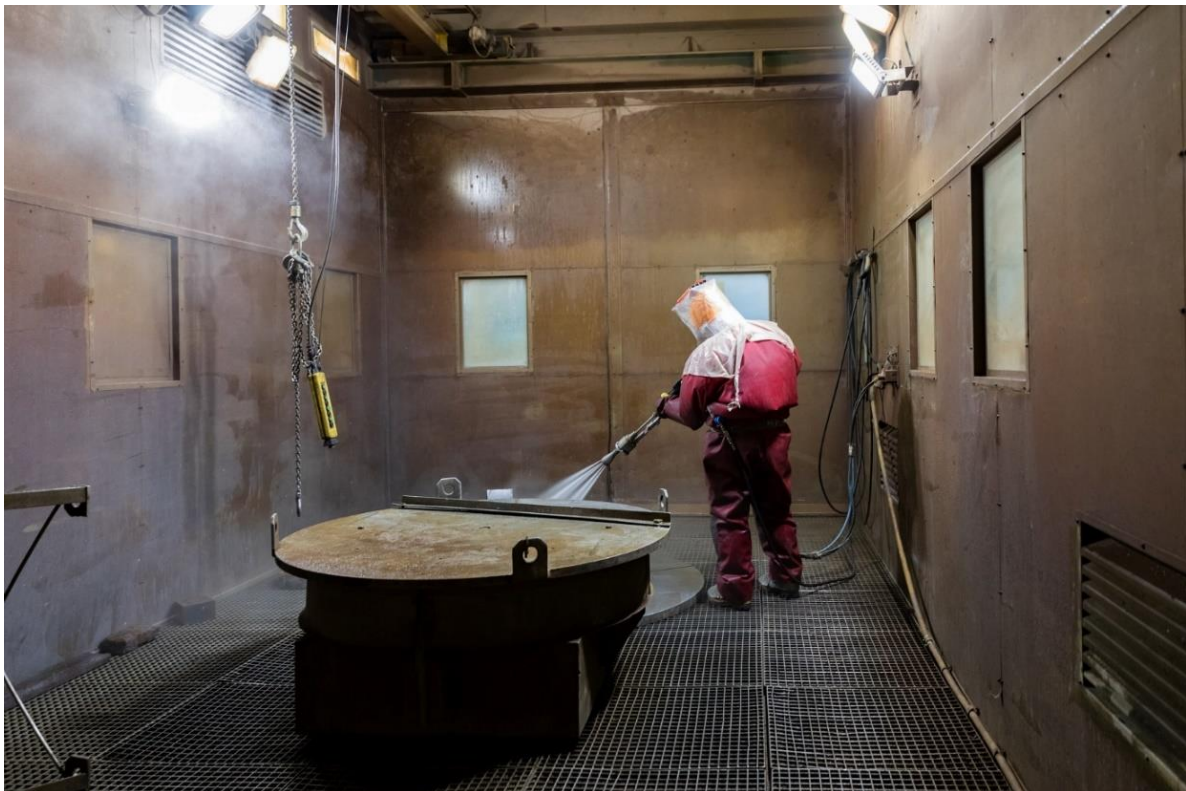


Figure 3 - Opération de décontamination en cours de déchets métalliques par jet d'eau à haute pression (EWN (Entsorgungswerk für Nuklearanlagen) © Philippe Dureuil/Médiathèque IRSN

La décontamination est une activité essentielle dans le nucléaire, que cela soit pour les activités de maintenance lors des arrêts de tranche de réacteurs nucléaires, que pour les sites en démantèlement.

Pour décontaminer, il existe plusieurs méthodes :

- Produits chimiques (liquides, mousses, gels, etc.) ;
- Jet d'eau à haute pression ;

- Approche abrasive (sablage, etc.) ;
- Approche mécanique (laser, etc.) ;
- Revêtement retirable.

En fonction de la méthode utilisée, le coefficient de décontamination (efficacité de la méthode) et les risques associés diffèrent. Pour l'utilisation de produits chimiques et pour le jet d'eau à haute pression, l'une des principales contraintes est la génération de déchets secondaires. Ces déchets secondaires correspondent à deux cas de figure :

- Soit l'eau appliquée après utilisation des produits chimiques pour nettoyer les surfaces ;
- Soit l'eau provenant directement du jet à haute pression.

Dans les deux cas, l'eau générée est contaminée et doit être traitée. Ceci est problématique car cela nécessite de récupérer cette eau produite mais aussi d'avoir sur site une installation permettant le traitement de ces effluents liquides. Soit le site n'a pas de station de traitement et cela entraîne un surcoût très élevé, soit il existe une station de traitement mais elle traite déjà des effluents pour lesquels elle a été conçue.

Sachant que le traitement des effluents a un impact opérationnel sur la station de traitement mais aussi financier, toute réduction du volume de déchets secondaires est bénéfique.

Pour ce challenge de réduction d'effluents, il est possible d'imaginer le consortium DEMAIN travailler sur cette problématique, notamment à travers le laboratoire du **CRPP** pour l'utilisation de colloïdes pour la décontamination de radionucléides sur des parois d'installations nucléaires.

Dans la situation où un cas d'usage précis est aussi fourni, il est possible d'y adjoindre un porteur robotique afin de protéger l'opérateur sur les activités de décontamination par colloïdes. Dans ce cas de figure, le **LaBRI** pourrait être impliqué.

Préparation du dossier de démantèlement pour le décret de démantèlement

D'après l'article L. 593-28 du code de l'environnement, les activités de démantèlement d'une installation nucléaire (INB) ne peuvent commencer que si l'exploitant du site fournit un dossier de démantèlement. Si le dossier de démantèlement est validé par les autorités compétentes, alors le décret de démantèlement peut être publié.

Obtenir ce décret n'est pas une formalité et requiert de nombreux travaux préparatoires¹. Parmi ces derniers, il est nécessaire de prouver que les activités de démantèlement et de gestion de déchets n'impactent pas l'environnement ni la santé publique. A cet effet, une étude d'impact est demandée².

Cette étude d'impact analyse toutes les activités de démantèlement mais impose aussi la mise en place de moyens permettant de réduire et contrôler l'impact sur l'environnement.

Dans ce cadre-là, avec l'augmentation prévue du nombre d'installations à l'arrêt et à démanteler, le laboratoire **EPOC** peut offrir une analyse des potentiels risques sur des plans d'eau sachant que toute INB se trouve à proximité d'un plan d'eau. L'idée est de conceptualiser le risque afin de montrer aux autorités compétentes que le risque est pris en compte.

¹ https://www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/producteur-industriel/nucleaire/Notes%20d%27information/dem_fessenheim_p3.pdf

² <https://www.gard.gouv.fr/content/download/10483/68879/file/PHENIX%20Etude%20d%27impact.pdf>



Figure 4 Étude d'impact produite par le CEA pour le démantèlement de l'installation nucléaire de Phénix

De plus, **EABX** pourrait aussi apporter des compétences intéressantes, notamment au niveau du développement de marqueurs biologiques afin de s'assurer du respect de la protection de l'environnement.

Promotion d'un modèle socio-économique national pour l'essor de l'A&D

Les défis croissants du marché mondial du démantèlement nucléaire en France et dans le monde peuvent un sujet brûlant. En effet, dans le contexte politique, économique et écologique actuel, il y a maintenant des signes clairs qu'une renaissance nucléaire est en cours dans toute l'Europe. Tout le monde peut reconnaître que l'impact de la crise énergétique actuelle, liée à l'effet du changement climatique, a été clairement ressenti.

En parallèle de cela, le démantèlement nucléaire est en effet en train de devenir une branche incontournable de l'industrie nucléaire. Avec près de 70% du parc nucléaire mondial âgé de plus de 30 ans, le nombre de réacteurs commerciaux à déclasser augmentera fortement d'ici 2040. Au cours des 20 prochaines années et sur la base des licences d'exploitation actuelles, les 203 réacteurs déjà fermés seront rejoints par environ 200 autres réacteurs commerciaux et de recherche.

Ici, en compétition avec cette renaissance nucléaire, les problématiques de ressources humaines semblent inévitables. Cependant, les possibilités de développer et de mettre en œuvre de nouvelles approches et technologies semblent également une opportunité majeure pour offrir des moyens plus efficaces de faire progresser l'A&D.

Le démantèlement est en effet un processus complexe et multidisciplinaire, qui comprend des activités telles que la caractérisation physique et radiologique, la décontamination, le démantèlement ainsi que la gestion des déchets. En vérité, la viabilité à long terme de l'ensemble du secteur nucléaire

de l'A&D pourrait résider dans la mise en œuvre réussie d'une gestion efficace et multidisciplinaire des activités de déclassement et de gestion des déchets, du développement et de l'implémentation d'innovations technologiques pertinentes. Mais aussi et surtout dans la mise en place et une gestion efficace d'un tissu socio-économique élargie au transfert ou co-développement de technologie d'autres secteurs industriels.

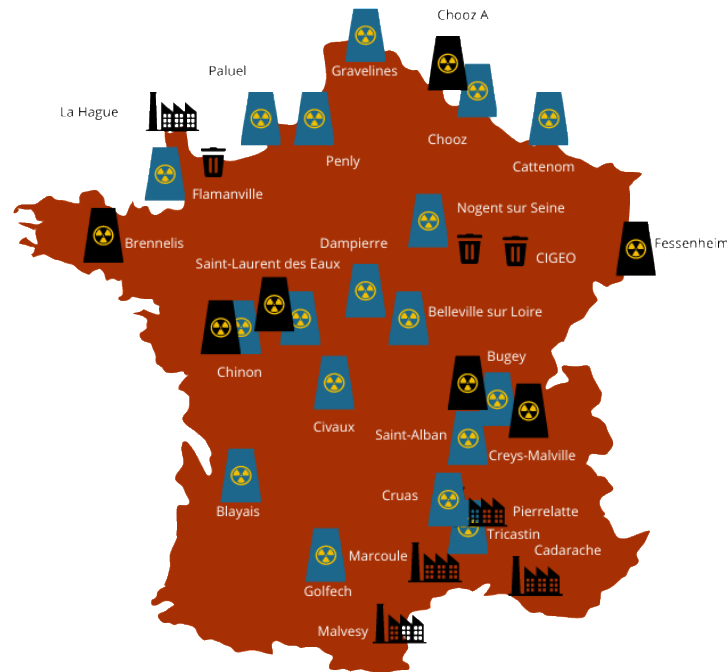


Figure 5 Répartition des sites nucléaires français

Il est clair que les problématiques liées au second souffle du secteur nucléaire et les besoins en plein essor de l'A&D seront multiples et transversaux. Ils touchent par exemple à des domaines aussi variés que :

- Les ressources humaines, le recrutement, la rétention des effectifs ;
- La mise en place de nouvelles politiques industrielles favorisant la transition nécessaire à l'essor de l'A&D ;
- La mise en place de modèles politiques favorisant le tissu socio-économique autour de l'A&D et de ses besoins ;
- La mise en place de modèles industriels et socio-économiques favorisant le développement et l'implémentation de technologies innovantes et leur essaimage. Par exemple, les outils de management des données et de modélisation offerte par la digitalisation, l'intelligence artificielle et la robotique ;
- La remise à niveau du modèle social avec l'arrivée et l'intégration de ces nouvelles technologies dans le modèle industriel de l'A&D ;
- La problématique de la rétention des connaissances et des compétences ;
- La réflexion sur la structure organisationnelle optimisant les capacités l'A&D, ses besoins en ressources (humaines et financières) et limitant les risques pour les travailleurs.

Pour les problématiques mises en avant ici, le **CED**, **BPH** et **BSE** seront essentiels pour identifier la composante sociale du démantèlement nucléaire. Leurs compétences, liées à celles d'autres laboratoires du consortium DEMAIN tels que le **LP2i**, le **CRPP**, l'**I2M**, l'**ISM** et le **LaBRI** (mais aussi potentiellement à tout le consortium) pourront, de façon transverse, aider à mettre en avant un modèle visant à promouvoir l'optimisation des besoins, des performances de la filière A&D mais aussi aider à la planification des besoins en compétences et technologies pour l'A&D dans les années ou décennies à venir.

