



HAL
open science

DTCD - Département d'études du traitement et du conditionnement des déchets

Rapport Hcéres

► **To cite this version:**

Rapport d'évaluation d'une entité de recherche. DTCD - Département d'études du traitement et du conditionnement des déchets. 2014, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives - CEA. hceres-02032873

HAL Id: hceres-02032873

<https://hal-hceres.archives-ouvertes.fr/hceres-02032873>

Submitted on 20 Feb 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



agence d'évaluation de la recherche
et de l'enseignement supérieur

Section des Unités de recherche

Évaluation de l'AERES sur l'unité :
Département d'études du Traitement et du
Conditionnement des Déchets
DTCD
sous tutelle des
établissements et organismes :
Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies
Alternatives



Décembre 2013



agence d'évaluation de la recherche
et de l'enseignement supérieur

Section des Unités de recherche

*Pour l'AERES, en vertu du décret du 3
novembre 2006¹,*

- M. Didier HOUSSIN, président
- M. Pierre GLAUDES, directeur de la section
des unités de recherche

Au nom du comité d'experts,

- M. Jean-Claude CHARPENTIER,
président du comité

¹ Le président de l'AERES « signe [...], les rapports d'évaluation, [...] contresignés pour chaque section par le directeur concerné » (Article 9, alinea 3 du décret n°2006-1334 du 3 novembre 2006, modifié).



Rapport d'évaluation

Nom de l'unité :	Département d'études du Traitement et du Conditionnement des Déchets
Acronyme de l'unité :	DTCD -CEA Marcoule
Label demandé :	
N° actuel :	
Nom du directeur (2013-2014) :	M. LUC PARADIS
Nom du porteur de projet (2015-2019) :	M. LUC PARADIS

Membres du comité d'experts

Président :	M. Jean-Claude CHARPENTIER, ENSIC Nancy, Université de Lorraine
	M. Martin CYR, Insa-Toulouse
Experts :	M. Werner KUNZ, Université de Regensburg, Allemagne
	M. Jacques LUCAS, Université Rennes 1
	M. Pierre VAN ISEGHEM, SCKCEN, Belgique

Délégué scientifique représentant de l'AERES :

M. Christophe GOURDON

Représentant(s) des établissements et organismes tutelles de l'unité :

M. Bernard BONIN, DEN-CEA

M. Gilles BORDIER, CEA Marcoule

M. Marc DELPECH, DISN DEN-CEA



1 • Introduction

Historique et localisation géographique de l'unité

Le Département d'études du Traitement et du Conditionnement des Déchets (DTCD) du Centre CEA-Marcoule est une unité de la Direction de l'Énergie Nucléaire (DEN) créée en 2004, localisée sur le site de Marcoule et impliquée dans toutes les études relatives au traitement et au conditionnement des déchets nucléaires conduites à la DEN.

Le DTCD a pour principales missions d'une part le pilotage des programmes de R&D (i) pour le traitement des déchets radioactifs solides et liquides (décontamination, incinération), (ii) pour les matériaux de conditionnement des déchets et leur comportement dans le temps et (iii) pour les procédés d'enrobage (bitumage, cimentation) et de conditionnement (vitrification, céramisation) et d'autre part la valorisation « hors nucléaire » de ses compétences et des procédés développés avec des techniques mettant en œuvre les fluides supercritiques et l'ultrafiltration.

Le périmètre et les missions de recherche scientifique de base et de R&D sont en grande partie liés à l'option industrielle du cycle fermé dans l'industrie nucléaire avec des activités majoritairement conditionnées à la pérennité de cette option industrielle. Ils comportent une approche « filière » visant tout à la fois la réduction du volume des déchets et des effluents secondaires issus des procédés de traitement, la durabilité et la qualité des colis produits pour accroître les performances du stockage et la réduction des coûts du traitement et du conditionnement des déchets nucléaires.

Pour conduire ses activités le DTCD s'appuie sur les laboratoires et halls d'essais non radioactifs de l'Installation Classée pour la Protection de l'Environnement (ICPE) CD pour le Conditionnement des Déchets, sur les laboratoires de chimie et halls de développement de l'Installation G1, sur les chaînes blindées et laboratoires d'examen de l'Installation DHA (Déchets à Hautes Activités) localisée dans l'INB ATALANTE pour les déchets de haute activité et combustibles irradiés et sur les plateformes technologiques implantées dans le Hall d'essais pour l'Entreposage de matières RADIOACTIVES (HERA).

Enfin, le DTCD est partie prenante du Laboratoire Commun de Vitrification (LCV) situé à Marcoule et créé en 2010 avec AREVA NC dans le domaine du traitement et du conditionnement des déchets radioactifs par des procédés à haute température. Le département est également en charge de l'animation du Pôle de compétences « sûreté des déchets » qui fait partie du réseau des Pôles de compétence du CEA.

Équipe de Direction

L'équipe de direction est chargée de définir les orientations stratégiques du département et d'en assurer le pilotage administratif et budgétaire. Elle est composée:

- d'un chef de département et de son adjoint ;
- d'un directeur de recherche ;
- d'une assistante affaires générales ;
- d'un ingénieur qualité ;
- d'un contrôleur de gestion ;
- de 5 chefs de projets.

Nomenclature AERES

ST5 (Sciences pour l'Ingénieur, SPI)



Effectifs de l'unité :

Effectifs de l'unité	Nombre au 30/06/2013	Nombre au 01/01/2015
N1 : Enseignants-chercheurs titulaires et assimilés		
N2 : Chercheurs des EPST ou EPIC titulaires et assimilés	142	140
N3 : Autres personnels titulaires (n'ayant pas d'obligation de recherche)	15	14
N4 : Autres enseignants-chercheurs (PREM, ECC, etc.)		
N5 : Autres chercheurs des EPST ou EPIC (DREM, Post-doctorants, visiteurs etc.)	8	
N6 : Autres personnels contractuels (n'ayant pas d'obligation de recherche)		
TOTAL N1 à N6	165	154

Effectifs de l'unité	Nombre au 30/06/2013	Nombre au 01/01/2015
Doctorants	27	
Thèses soutenues	42	
Post-doctorants ayant passé au moins 12 mois dans l'unité *	39	
Nombre d'HDR soutenues	5	
Personnes habilitées à diriger des recherches ou assimilées	11	16



2 • Appréciation sur l'unité

Avis global sur l'unité

Le DTCD conduit des études qui répondent à des missions clairement définies et affichées face à des enjeux forts sur les plans sociétal, industriel et scientifique. Ce sont des études qui portent sur l'assainissement-démantèlement, la reprise et le conditionnement des déchets anciens, qui s'inscrivent avec le partenariat industriel avec AREVA pour le traitement et le conditionnement des déchets actuels et futurs ; ce sont des études qui requièrent la capacité à démontrer que des solutions pérennes et fiables existent face à la demande sociétale sur les déchets nucléaires. De plus, le DTCD a une mission de valorisation « hors nucléaire » de ses compétences et des procédés développés dans le domaine du nucléaire.

Le département comporte trois services de R&D. Ce sont respectivement le Service des Procédés de Décontamination et d'Enrobage des Déchets (SPDE), le Service d'Études et Comportement des Matériaux de Conditionnement (SECM) et le Service de Conditionnement des Déchets et de Vitrification (SCDV) qui comporte notamment l'exploitation de l'Installation CD (Conditionnement des Déchets) avec 120 personnes concernées (expérimentateurs et exploitants) et un budget d'exploitation de 2,5 M€.

Pour conduire ses activités, le DTCD dispose sur le site de Marcoule de laboratoires et halls d'essais qui ont été visités par le comité d'experts. Il s'agit des laboratoires et halls d'essais non radioactifs de l'Installation (ICPE) CD pour le comportement des déchets, des laboratoires de chimie et halls de développement de l'Installation G1, des chaînes blindées et laboratoires d'examen de l'Installation DHA au sein de l'INB ATALANTE pour les déchets à haute activité et les combustibles irradiés et des plateformes technologiques implantées dans le Hall d'essais pour l'Entreposage de matières RADIOACTIVES (HERA). Il s'agit également des installations du Laboratoire Commun de Vitrification (LCV) avec AREVA où en tant que bailleur des procédés de vitrification mis en œuvre à La Hague par AREVA, le DTCD accompagne l'exploitant dans sa maîtrise du fonctionnement des procédés et apporte son soutien scientifique et technique pour répondre aux évolutions des installations industrielles existantes.

Les activités du département faisant l'objet de l'évaluation par l'AERES concernent 157 salariés (72 techniciens et 85 ingénieurs dont 80 sont des ingénieurs-chercheurs et 5 sont des ingénieurs affectés à l'exploitation des installations en soutien à la R&D) qui travaillent en synergie avec les autres départements de Marcoule (DRCP, DTEC et ICSM). Il faut ajouter une dizaine de personnes d'AREVA qui appartiennent au laboratoire LCV et qui contribuent aux actions de R&D essentiellement sur la vitrification et les procédés thermiques.

Les activités du DTCD ont été regroupées en 5 thématiques scientifiques qui peuvent être transverses par rapport à l'organisation en services et laboratoires du département. Ces thématiques sont : (i) Vitrification des effluents de moyenne et haute activité (VIT) (R&D de procédés de vitrification/céramisation des déchets et modélisation associée et formulation des matrices de confinement), (ii) Procédés thermiques pour le traitement des déchets radioactifs (PTH) (développement de procédés innovants : incinération, incinération/vitrification, oxydation hydrothermale), (iii) Matrices cimentaires pour le conditionnement de déchets radioactifs (CIM) (formulation des matrices cimentaires de conditionnement des déchets de faible et moyenne activité et études de caractérisation physico-chimiques associées), (iv) Décontamination de solides et effluents radioactifs (DEC) (procédés mettant notamment en œuvre des fluides complexes : fluides denses et supercritiques, tensioactifs, mousses et gels), (v) Comportement à long terme des colis de déchets radioactifs (CLT) (verres, combustibles usés, bitumes, comportement à long terme des matrices de confinement et du combustible usé et modélisation du comportement transitoire des matériaux de confinement dans leur environnement de stockage ou d'entreposage).

La lecture des documents écrits extrêmement bien circonstanciés, le professionnalisme et la qualité des exposés ainsi que la très grande préparation et qualité des visites en laboratoire pendant la visite du comité d'experts laissent une impression globale très favorable du DTCD, fleuron français pour le traitement et le conditionnement des déchets radioactifs dont certaines activités aval de R&D sont une réussite sans équivalent dans le monde.



En effet si l'on examine la production scientifique et la qualité des développements technologiques, le rayonnement et l'attractivité académiques, l'implication dans la formation par la recherche et l'interaction avec l'environnement social, économique et culturel, les appréciations ne peuvent être qu'éminemment positives. Il en est de même pour l'organisation et la vie du département. Enfin la stratégie et le projet à 5 ans, projet cohérent et lucide, bien présenté par le chef de département, avec notamment une très bonne analyse SWOT, se situe dans un environnement politique complexe et mouvant qui nécessite de grandes prises de risques. L'avis sur ce projet est très favorable et le projet augure bien de l'avenir du département DTCD qui a capitalisé et rassemblé des compétences en personnels et des outils et équipements dont certains sont uniques au monde (connaissances scientifiques et technologiques pour l'utilisation d'une matrice vitreuse pour confiner des déchets radioactifs, ou pour la cimentation des sous-produits de l'industrie nucléaire).

Points forts et possibilités liées au contexte

- missions clairement définies pour le pilotage des programmes de R&D et pour la valorisation hors nucléaire ;
- compétences et inventivité du personnel (50% des ingénieurs-chercheurs sont experts dont 3 directeurs de recherche, 3 experts internationaux, 16 experts seniors et 11 HDR) ;
- capacité à couvrir des projets d'envergure dans le domaine du nucléaire depuis la recherche scientifique de base jusqu'au développement technologique sur pilote industriel, avec une réelle autonomie, et plus généralement ;
- capacité de gérer les projets, de la conception à l'industrialisation, selon des axes d'études guidés par le retour d'expérience (REX) grâce aux partenariats industriels, et capacités d'adaptation et de montée en puissance sur des sujets nouveaux ;
- installations et équipements spécifiques incontournables avec des pilotes à l'échelle industrielle, avec les halls d'essais non radioactifs de l'Installation (ICPE) CD pour le comportement des déchets et avec les installations de haute activité (HERA, DHA, G1) ;
- mise en place du Laboratoire Commun de Vitrification (LCV) avec AREVA : établissement d'un plan à moyen et long terme (PMLT) à 10 ans qui assure une vision pluriannuelle partagée des programmes de recherche avec le souci de maintenir la compétence dans la durée avec un effectif de chercheurs stable et un lissage des charges d'investissement ;
- sources de financements multiples représentant 80% du budget, mais autorisant quand même une certaine régulation budgétaire ;
- résultats valorisés par des brevets et des développements avec différents partenaires industriels ;
- étant donné l'importance que prend la question de l'assainissement-démantèlement et de la reprise et du conditionnement de déchets anciens, les activités du thème DTCD devraient à terme se développer et notamment intéresser les futurs assainisseurs ;
- en ce qui concerne l'interaction avec l'environnement sociétal, le thème « décontamination » peut renforcer l'image de marque du CEA comme organisme de haute technologie au service de la société, à condition qu'une certaine publicité soit envisagée ;
- bénéficiant d'une antériorité de plus de 30 ans, le département se classe en tête au plan mondial pour les connaissances scientifiques et technologiques concernant l'utilisation d'une matrice vitreuse pour confiner des déchets radioactifs. De plus l'activité « Recherche Verre » associée à l'objectif final de confinement est de très haut niveau scientifique. De fait les activités de la thématique VIT répondent non seulement au cahier des charges d'AREVA, mais sont très reconnues et respectées par la communauté scientifique. En effet, le groupe d'ingénieurs-chercheurs et de techniciens du DTCD a réussi à se faire une excellente image scientifique « hors nucléaire » et leur apport à la connaissance des compositions verrières, des propriétés rhéologiques, des phénomènes de corrosion les placent également dans le peloton de tête au niveau mondial des laboratoires de recherche sur le verre ;
- évidente adaptabilité du département à répondre techniquement à de nombreux partenaires : agences de recherches scientifiques et de R&D, autres partenaires industriels qu'AREVA ;
- production scientifique multiforme avec des rapports techniques de très grande qualité et des publications de très haut niveau, voir top mondial dans le domaine des verres ;



- bon rayonnement et attractivité académiques du DTCD avec un nombre élevé de doctorants et un très bon encadrement ;
- satisfaction totale des personnels concernant l'organisation de la vie du département avec un fort sentiment d'appartenance à l'organisme ;
- multiples implications du DTCD dans la formation par la recherche : encadrement de thèses, nombreux enseignements dans les universités et écoles d'ingénieur et bonne implication et responsabilité dans les réseaux de formation nationaux et internationaux ;
- pertinence scientifique aux niveaux national et international des collaborations avec les meilleures équipes universitaires ;
- stratégie et projet à 5 ans cohérent, lucide et ambitieux.

Points faibles et risques liés au contexte

- financement majoritairement sur recettes externes (80% du budget de fonctionnement) ;
- partenariats industriels qui restent spécifiques et en nombre très limité : AREVA, EDF, ANDRA, et forte dépendance de AREVA (80% des ressources externes qui cofinancent les actions de R&D du DTCD) ;
- le partenariat quasi exclusif avec AREVA dans le domaine des procédés à hautes températures constitue un frein à l'établissement de nouveaux partenariats ;
- le niveau de financement interne sur des programmes propres CEA est faible et soumis à des réductions budgétaires attendues, conduisant à mettre en situation difficile certaines compétences scientifiques et à ne pas faciliter l'embauche prévue de thésards ;
- vieillissement du parc analytique de l'installation ATALANTE dédié aux analyses sur verres actifs et/ou combustibles usés ;
- les collaborations internationales mériteraient d'être mieux développées, certains ingénieurs-chercheurs du DTCD ayant largement la stature pour cela. Il y a peu ou pas de mobilité internationale des chercheurs, ce qui est dommage pour l'avancement de certaines thématiques ;
- valorisation du portefeuille de brevets à améliorer dans les domaines nucléaires et surtout hors nucléaire ;
- visibilité scientifique des experts parfois limitée par les contraintes induites par la confidentialité industrielle ;
- production scientifique multiforme avec des rapports techniques pour la plupart de très grande qualité et qui mériteraient des publications dans des revues de haut niveau, et pas seulement dans des revues du domaine nucléaire (cela vaut notamment pour les thématiques PTH et CIM) ;
- il existe un certain cloisonnement préjudiciable entre les thématiques du DTCD (CLT par exemple, qui développe plusieurs modélisations à long terme qui pourraient profiter aux autres thématiques) ;
- compte tenu des problèmes de financement évoqués, il existe trop peu de demandes de type ANR et/ou projets européens ;

Et surtout

- risques liés au projet lucide, mais ambitieux dans un environnement politique complexe et mouvant et dans un cadre financier public prévisionnel de décroissance budgétaire, avec de plus une obligation de mobiliser de plus en plus de ces crédits pour la sûreté-sécurité des installations (notamment travaux supplémentaires suite aux évaluations complémentaires de sûreté post-Fukushima).
- cette diminution budgétaire sur fonds publics risque d'impacter et de fragiliser la recherche scientifique de base non associée à un développement de procédé spécifique financé par des partenaires industriels.



Recommandations

Du fait d'un environnement politique complexe et mouvant (remise en cause du retraitement du combustible usé, report de l'ouverture du site de stockage profond CIGEO, etc) et de plus dans un cadre financier prévisionnel de décroissance budgétaire, force est de constater que la stratégie du DTCD comporte une grande prise de risques pour un projet cohérent. Néanmoins compte tenu de la qualité et de la compétence de ses équipes de recherche et de R&D, le département DTCD qui est un fleuron français pour le traitement et le conditionnement des déchets radioactifs possède tous les ingrédients pour la mener à bien.

Les recommandations du comité d'experts AERES ne peuvent donc que conforter la stratégie proposée et son projet, à savoir (i) maintenir le niveau scientifique et les compétences nécessaires dans un contexte de décroissance des effectifs de la DEN (construction du PMLT du laboratoire LCV avec AREVA, adaptation de la structure des équipes aux évolutions de programme, gestion des compétences critiques), (ii) maintenir la visibilité et la reconnaissance de l'expertise du DTCD (effort de publication dans des revues à haut comité de lecture, favoriser le passage des HDRs et optimiser l'accueil des thésards par un processus de cartographie des thèses identifiant les sujets prioritaires à cofinancer avec les partenaires industriels, participation à l'organisation des congrès internationaux et à des réseaux internationaux) et (iii) valoriser les activités du DTCD hors nucléaire et dans les programmes Défense.

Il est de plus recommandé de montrer et d'insister sur le caractère structurant de ce projet qui mériterait une meilleure vision globale quant à sa présentation.

Le comité d'experts AERES recommande tout particulièrement d'engager une fraction importante des compétences du DTCD vers une valorisation hors nucléaire, comme indiqué précédemment en (iii).



3 • Appréciations détaillées

Appréciation sur la production et la qualité scientifiques

La production scientifique du DTCD est multiple. Elle varie entre 200 et 300 éléments par an, avec une forte progression entre 2010 et 2012. Elle est d'une part majoritairement constituée de l'ensemble des communications classiques de la communauté scientifique : actes des communications dans les congrès nationaux et internationaux, dans les écoles d'été et journées scientifiques, publications dans des revues avec comité de lecture, de haut, voire de très haut niveau, livres, mémoires de thèse et brevets. Elle est d'autre part constituée de documents techniques (notes et rapports) internes au CEA dont approximativement la moitié sont en diffusion restreinte (DR) pour des considérations de confidentialité. On recense globalement 2 documents par an et par ingénieur-chercheur (notes, rapports, publication ACL).

Sur la période 2008-2013, on recense environ 1300 documents dont 240 articles scientifiques (40 % pour la thématique CLT) et 420 actes de colloques, 50 ouvrages et contributions à ouvrages, 470 rapports et notes techniques, et 41 brevets (en majorité pour la thématique DEC).

Les documents techniques (85 à 100 par an) décrivent les résultats obtenus (Notes Techniques), les mettent en perspective (Rapports Techniques) ou bien sont des propositions de programmes de recherche (notes d'orientation, plans de développement). En ce qui concerne les notes et rapports techniques, les exemplaires laissés à l'appréciation des membres du comité AERES ont montré que leurs contenus soutenaient pour bon nombre d'entre eux une bonne comparaison avec les publications dans les journaux scientifiques de haut rang. Ils montrent et portent, le plus souvent de très façon originale, sur des avancées ou des ruptures technologiques de développement de procédés, sur la métrologie et le développement de plateformes technologiques qui caractérisent le domaine du nucléaire mais qui pourraient à l'avenir s'appliquer dans d'autres domaines.

Chaque thématique présente un type de communications correspondant à la nature de ses objectifs et à son profil d'activité: publications scientifiques en majorité pour (CLT), mais aussi pour (VIT) et (CIM), documents techniques pour (CLT) et (VIT), mais aussi pour (DEC) et brevets en majorité pour la thématique (DEC), mais aussi pour la thématique (PTH) dans les années à venir (Projet PIVIC d'Incinération/Vitrification).

Le nombre de publications scientifiques ACL du DTCD est d'une quarantaine d'articles par an et il est en augmentation depuis 2010 avec une évolution différenciée suivant les thématiques. La répartition est : 40 % (CLT), 25 % (VIT), 15 % (CIM), 12 % (DEC) et 8 % (PTH). Leur impact en termes scientifiques est très bon. On note par exemple que les ingénieurs-chercheurs des thématiques (VIT) et (CLT) se placent au top mondial en ce qui concerne leurs publications dans des revues de référence dans le domaine des verres (composition, propriétés rhéologiques, phénomènes de corrosion) et dans la modélisation de l'altération des verres. On suggère par contre pour certains thèmes comme (DEC) et (CIM) de veiller à encore mieux traduire en termes de publications scientifiques de haut niveau les résultats remarquables des recherches menées, et ce, pas uniquement dans des revues spécialisées dans le domaine du nucléaire. Quant à la thématique (PTH) pour laquelle les opportunités de publication sont plus rares, on suggère de continuer de maintenir l'effort de publications dans des revues à haut facteur d'impact, comme cela a été fait jusqu'à présent.

Appréciation sur le rayonnement et l'attractivité académiques

Pour mener à bien la politique scientifique affichée, cela suppose de soutenir une démarche proactive d'innovation et de créativité scientifique qui nécessite de s'intégrer dans des réseaux de collaboration et de partenariat avec des équipes universitaires de haut niveau. C'est pourquoi le département mène une politique volontariste qui repose sur des partenariats actifs au travers d'une vingtaine de collaborations bilatérales d'une part au niveau national (le Pôle Balard des équipes de chimistes de la Région Languedoc-Roussillon, le Pôle parisien des Écoles d'Ingénieurs de Chimie, les Écoles d'Ingénieurs de Génie Chimique et des matériaux de Nancy et Toulouse, des pôles grenoblois, marseillais, lillois, lyonnais, nantais...) et d'autre part au niveau international (collaborations spécifiques avec des partenaires américains, japonais, allemands, indiens...).



L'analyse de la production scientifique du DTCD montre de fait qu'un grand nombre de publications est effectué en collaboration avec un organisme extérieur. Elles sont pour l'essentiel centrées autour des thématiques portant sur les matériaux (composition, comportement) et sur les procédés. Elles concernent une vingtaine de laboratoires français avec comme partenaires privilégiés, l'Institut de Chimie Séparative de Marcoule (ICSM), l'ENSCM et l'Université de Montpellier 2, l'UPMC Paris, École Nationale Supérieures de Chimie de Paris-ParisTech, l'Université d'Aix-Marseille et l'École Polytechnique. On recense par ailleurs des collaborations avec des équipes étrangères comme le PNNL et l'Université de Washington (USA) pour les matrices de confinement et le comportement à long terme des verres, le DAE (Inde) pour le comportement à long terme des verres et les techniques de décontamination, l'ITU (Allemagne) pour la caractérisation de verres actifs ou encore comme le JAEA/JNFL (Japon) pour le traitement des déchets et vitrification.

Le DTCD ne participe pas ou participe peu à des réseaux européens. Toutefois sa présence internationale est patente et on mentionnera par exemple l'organisation en 2011 par les spécialistes de la cimentation du département du 1er Congrès « NUWCEM » sur la cimentation des déchets radioactifs avec la participation de 195 chercheurs et de 22 nationalités.

La reconnaissance de l'expertise et de la compétence des membres du DTCD est excellente. En effet le département possède 3 directeurs de recherche, 3 experts internationaux, 16 experts seniors et 22 experts (ce qui correspond à 50 % des ingénieurs-chercheurs du département). Les membres du DTCD sont souvent sollicités pour de nombreuses expertises internationales. On mentionnera : l'expertise post-Fukushima demandée conjointement par les directions du CEA et d'AREVA pour la mise au point de procédés de traitement des eaux de mer utilisées pour refroidir le cœur de la centrale nucléaire et pour proposer des technologies pour la décontamination environnementale des sols et effluents ; une expertise conjointe CEA/AREVA des ateliers de vitrification de Rokkasho-Mura (Japon) et de Sellafeld (UK) ; les expertises des programmes de R&D menés dans d'autres pays (Suède, USA, Finlande, Belgique, etc). On notera de plus que deux experts du DTCD sont nommés « Chief Scientific Investigator » de 2 projets de recherche de l'AIEA inclus dans le CRP « Processing Technologies for High Level Waste, Formulation of matrices and Characterization of Waste Forms », l'un sur la vitrification, l'autre sur le comportement à long terme des combustibles usés. Par ailleurs, les membres du DTCD sont souvent sollicités en tant que rapporteurs d'articles scientifiques, membres du comité éditorial de revues scientifiques et techniques ou encore pour l'expertise de dossiers ANR.

Il faut ajouter la remise de nombreux prix aux membres du DTCD à des congrès nationaux et internationaux pour la qualité de leurs travaux et sera mentionnée tout particulièrement la remise en 2010 du Trophée INPI de l'Innovation en Région Languedoc-Roussillon au Laboratoire des Fluides Supercritiques (LFSM) du DTCD pour sa stratégie en matière de propriété industrielle et ses succès en matière de transferts de technologie.

Appréciation sur l'interaction avec l'environnement social, économique et culturel

Le DTCD conduit des études qui répondent à des missions clairement définies et affichées face à des enjeux forts sur les plans sociétal, industriel et scientifique. Il s'agit notamment d'études qui portent sur l'assainissement-démantèlement, la reprise et le conditionnement des déchets anciens et qui s'inscrivent dans un partenariat privilégié avec AREVA pour le traitement et le conditionnement des déchets actuels et futurs. De plus, le département a une mission de valorisation « hors nucléaire » de ses compétences et des procédés développés dans le domaine du nucléaire. Ainsi les profils d'activités du DTCD sont fortement marqués par le poids des interactions avec les partenaires industriels et il est souvent délicat de distinguer précisément ce qui ressort des activités de type académique (recherche académique et formation par la recherche) de ce qui relève de l'interaction avec les industriels. Toutefois malgré le caractère R&D nécessairement marqué du DTCD, l'activité scientifique joue un rôle primordial, que ce soit pour comprendre les mécanismes physico-chimiques et les mécanismes d'évolution des matériaux pour les thématiques (CIM) ou (CLT) ou bien pour développer des approches de génie des procédés pour les thématiques qui ont une forte composante procédé, en lien très direct avec des applications industrielles. De plus l'existence de pilotes à l'échelle industrielle et leur exploitation génèrent une part volontairement importante de l'appui à la recherche scientifique pour les thématiques (VIT) et (PTH).



De fait, l'impact industriel du DTCD est notoire et éminent. 80 % des activités du DTCD sont consacrées aux interactions avec l'environnement avec des actions à finalité industrielle. Ces interactions concernent d'une part les actions menées en soutien à des projets industriels, en particulier et en majorité avec AREVA. Mais elles concernent d'autre part la valorisation industrielle des connaissances à la fois sous forme de brevets et sous forme de partenariat avec des petites entreprises : ainsi le DTCD et la société Diam Bouchage ont développé un procédé d'épuration de farine de liège par extraction de polluants organohalogénés en milieu CO₂ supercritique. La start-up DFD (Dégraissage par Fluide Dense) créée en 2012 s'appuie sur un accord de licence d'un brevet du DTCD pour concevoir, assembler et commercialiser des machines utilisant le CO₂ supercritique pour le nettoyage et le dégraissage industriels dans les secteurs de la mécanique et du textile. Par ailleurs, dans le cadre du projet FEDER MATCOS (2008-2012) les équipes du DTCD ont montré que les nanopoudres de Zirconium Yttrium synthétisée sous CO₂ supercritique présentent des performances très supérieures à celles fabriquées par des techniques plus classiques. Les résultats de cette recherche ouvrent la voie à des applications en catalyse pour les catalyseurs de piles à combustible. Ces actions de R&D s'appuient bien évidemment sur des travaux de recherche de base plus fondamentaux menés en collaboration avec le monde universitaire.

Il faut également noter que l'activité brevet du DTCD est importante principalement en décontamination (2 à 3 brevets par an), mais globalement en diminution sur la période 2008-2012. Toutefois le démarrage en 2012 du projet PIVIC va conduire à un regain d'activité inventive sur la thématique (PTH).

A titre socio-culturel, le DTCD reçoit périodiquement des scolaires, étudiants, scientifiques et institutionnels français et étrangers pour la visite de ses installations et il participe annuellement aux fêtes de la science pour les animations et démonstrations. On peut souligner également la forte implication du département dans les actions de communication et de pédagogie vers le grand public par l'intermédiaire du Visiatome, musée scientifique de Marcoule consacré aux enjeux énergétiques, à la radioactivité, à la question de l'énergie nucléaire et des déchets radioactifs. Le DTCD apporte un soutien particulier au Visiatome avec un de ses directeurs de recherche impliqué dans sa création entre 2003 et 2005 et qui y consacre 20 % de son temps.

Appréciation sur l'organisation et la vie de l'unité :

L'adéquation de la structuration du département à la logique des activités scientifiques et de R&D est patente. L'organisation hiérarchique du département comprend un échelon direction (chef de département et son adjoint, 1 assistante affaires générales, 1 directeur de recherche, 1 ingénieur qualité, 1 contrôleur de gestion et 6 chefs de projets et 3 chefs de service). Cette direction centrale et les chefs de service se réunissent deux fois par mois dans le cadre de la réunion du comité de département (CODEP). Ces réunions donnent lieu à une transmission d'informations générales émanant de la direction du centre de Marcoule ou de la Direction de l'Énergie Nucléaire (DEN) et d'informations liées à l'avancement des projets (difficultés, planning...) et aux aspects qualité, sécurité, environnement et ressources humaines (plan d'emploi, avancement, primes...). Les chefs de service mettent en place des réunions équivalentes bimensuelles pour leurs unités avec les chefs de laboratoire.

Afin de faciliter la coordination des actions communes avec les départements avec lesquels le DTCD a le plus grand nombre d'interfaces, des rencontres annuelles sont organisées.

Pour la communication interne et l'affichage de la politique scientifique et des programmes de recherche, une Assemblée Générale de tout le personnel du DTCD est organisée une fois par an par le chef de département au cours de laquelle il expose le bilan de l'année et les perspectives. Les chefs de service organisent également une réunion annuelle pour leur personnel. De plus se tient une fois par an un séminaire de management réunissant la ligne hiérarchique (direction, chefs de service et chefs de laboratoire) pour partager les objectifs et échanger sur les sujets d'intérêt du département.

Les activités de R&D du DTCD sont menées principalement en partenariat avec les industriels du cycle nucléaire (AREVA, EDF et ANDRA). C'est pourquoi des réunions d'avancement sont organisées 2 fois par an avec ces partenaires. Elles donnent l'occasion pour les ingénieurs-chercheurs du département de présenter leurs travaux et d'échanger sur les orientations à leur donner, et d'évoquer éventuellement de nouvelles actions pour l'année à venir. De plus, plusieurs séminaires thématiques sont organisés annuellement avec le partenaire principal AREVA.

Pour les actions sans cofinancement externe (actions propres au CEA), des réunions techniques d'avancement de projet et de revue de programmes permettent de définir les orientations à donner.



Sur le plan individuel chaque salarié est reçu par son responsable hiérarchique direct dans le cadre de l'entretien annuel. Les perspectives d'évolution sont discutées, notamment celles d'une orientation dans les différentes filières (hiérarchique, projet ou expert). Le bilan des formations suivies est fait et les formations pour l'année suivante sont discutées.

Plus généralement il se tient une fois par an la « Revue de Personnel » pour chaque unité du DTCD avec le Service du Personnel. Cette réunion est destinée à discuter des évolutions de parcours des salariés, des situations sensibles et des évolutions de compétences. A cette occasion, les différents viviers (hiérarchiques, projet, expertise, mouvements interservices/interdépartements) sont actualisés et un plan d'action est établi. Enfin, la direction du département et les chefs de service se réunissent une fois par an pour établir le plan emploi et anticiper les évolutions de parcours. Il est à souligner que ce plan emploi est complété par un plan de formation.

Les entretiens du comité d'experts avec des représentants des personnels dont les Élus au Conseil d'Unités du Département qui se réunit une fois par an se sont déroulés dans une atmosphère très cordiale. La satisfaction des personnels est générale quant à la résolution éventuelle des problèmes quotidiens qui remontent rapidement aux chefs de services. Les formations (avec un budget d'un montant de 110 k€, soit 520€ par salarié et par an) sont très adaptées notamment pour le management, la gestion de projets, la communication, la qualité, la sécurité, l'environnement, les métiers supports et les langues étrangères. Ce budget a été malheureusement réduit de 30% en 2013 pour cause de réduction budgétaire globale du CEA avec pour conséquences la réduction des formations en langues étrangères et la suppression des formations en bureautique. Pour l'avancement dans la carrière, il a été mentionné l'incitation faite aux ingénieurs-chercheurs docteurs de passer une HDR. Quant aux techniciens, l'approche de type 'formation tout au long de la vie professionnelle' (VAE) pourrait être davantage mise en avant afin de reconnaître encore mieux leurs acquis et compétences.

D'une façon générale le comité d'experts a apprécié la très bonne ambiance qui règne au DTCD qui comporte 85 ingénieurs-chercheurs et 72 personnels techniques, avec une organisation très matricielle qui mériterait peut-être parfois un petit zeste de souplesse et de flexibilité. Toutefois le comité a bien perçu le sentiment de bien-être et d'appartenance du personnel à l'organisme CEA.

Appréciation sur l'implication dans la formation par la recherche

La politique du DTCD repose également sur la promotion de la formation par la recherche qui se traduit par l'accueil et l'encadrement de jeunes thésards (une trentaine de thèses en cours), par la présence de 10 post-doctorants et de nombreux stagiaires (M1, M2 et élèves-ingénieurs) dans les équipes de R&D du DTCD et par la participation de nombreux ingénieurs-chercheurs du département à l'enseignement supérieur (400h par an réalisées par 30 ingénieurs-chercheurs dont 11 HDR). Ces enseignements se font dans les Écoles d'Ingénieurs ou dans les Universités qui proposent des formations en adéquation avec les compétences du département. Il faut mentionner qu'une part importante des enseignements concerne les cursus et cycles proposés par l'INSTN (Génie Atomique, BT et BTS Radioprotection, Master Ingénierie nucléaire) et le CEA/DEN (Formation Nucléaire de Base). Quatre ingénieurs-chercheurs du DTCD ont le statut d'enseignant-chercheur à l'INSTN (1 professeur, 1 maître de conférences et 2 chargés d'enseignement).

Pour encadrer les thésards, le DTCD en rapport avec les enseignants-chercheurs d'une vingtaine d'ED différentes dispose de 44 experts dont 3 directeurs de recherche, 3 experts internationaux et 16 experts seniors et parmi eux on recense 11 HDR. Une implication active des chercheurs se fait essentiellement dans les deux ED de l'Université de Montpellier 2 (ED 459 pour la chimie et ED 166 pour la physique) mais des contacts existent avec d'autres ED avec lesquelles le département entretient des collaborations plus spécifiques (Grenoble (électromagnétisme) et Lille (verres de phosphate). Il est intéressant de souligner que le département suit le devenir de ses doctorants. Ainsi sur la période 2008-2013, 42 thèses ont été soutenues avec le devenir suivant : ½ en CDI (AREVA, EDF, CEA, ANDRA) et ¼ post-doc ou CDD.

Les entretiens du comité d'experts avec les étudiants se sont déroulés dans une atmosphère très cordiale. Les discussions ont montré la grande qualité et l'efficacité de l'accompagnement et de l'encadrement des thésards. Elles ont laissé apparaître la satisfaction et le bien-être des thésards tout comme l'excellente ambiance qui règne au sein du département. Il faut dire que le CEA pourrait se substituer totalement à la formation doctorale des ED y compris pour les enseignements en cours de doctorat, les embauches et le suivi post-doc des docteurs. On peut souligner quand même les bons contacts qui semblent exister entre les doctorants et leurs ED de rattachement universitaire. On peut suggérer également à l'équipe de direction du DTCD de faciliter la présence des thésards qui le désirent dans les démarches de création de start-ups.



Appréciation sur la stratégie et le projet à cinq ans

Au cours d'un exposé très cohérent et lucide, le chef de département a présenté la stratégie et le projet à 5 ans. Une analyse SWOT pertinente permet entre autres choses d'insister sur les nombreuses opportunités et sur certaines menaces inquiétantes.

Les opportunités pour le département DTCD sont les enjeux industriels majeurs liés au contexte de la montée en puissance des attentes sociétales en matière d'assainissement/démantèlement et de reprise et conditionnement des déchets nucléaires anciens, où il s'agit de disposer de solutions pérennes pour la décontamination et le traitement des effluents et pour le comportement à long terme des colis de déchets radioactifs. Les études menées au département peuvent répondre à des questions soulevées dans un contexte post-Fukushima qui a mis en lumière la nécessité de disposer d'une palette de procédés et techniques de décontamination susceptibles d'être mis en œuvre en situation d'urgence ou de remédiation de territoires pour gérer des situations post-accidentelles. Les demandes sociétales concernant le stockage profond devraient également conduire à maintenir un haut niveau d'expertise dans le domaine du comportement à long terme des colis de déchets et à apporter les éléments de connaissance pour l'acceptation sociétale, et ce au moins jusqu'à l'ouverture du stockage (au plus tôt en 2025). De même il existe pour le département une capacité à construire une vision pluriannuelle de R&D avec AREVA dans le cadre du laboratoire commun de vitrification (LCV). Ainsi la signature récente d'un accord avec la Chine ouvrant la voie à la réalisation d'une usine de retraitement offre des perspectives de R&D en soutien à ce projet industriel d'AREVA, en particulier dans les domaines de vitrification et de comportement à long terme. Pour la valorisation hors nucléaire, la valorisation des compétences du DTCD devrait s'exercer dans des domaines où la réglementation environnementale se durcit comme le traitement des déchets industriels ou des déchets issus de la décontamination qui nécessitent des procédés plus économes en ressources (eau, énergie) et plus efficaces. Par ailleurs au niveau scientifique concernant la caractérisation structurale des matériaux, il est désormais possible pour le département de disposer de nouveaux outils et équipements pour acquérir des données jusqu'à présent inaccessibles sur le comportement sous auto-irradiation des matériaux. Enfin il faut mentionner le réseau de collaborations universitaires françaises actives dans le domaine de la recherche scientifique de base.

Les menaces proviennent du contexte économique fragile, des incertitudes concernant l'évolution de la stratégie française en matière d'électronucléaire (quid de la pérennité du cycle fermé dans l'industrie nucléaire qui comporte le retraitement du combustible usé ? Quid du devenir du stockage géologique profond des déchets, site CIGEO ?), de l'évolution permanente des contraintes réglementaires dans le domaine de la sûreté-sécurité, de la difficulté à assurer sur le long terme le financement de la recherche de base, des difficultés à assurer la continuité des compétences multiples dans un contexte budgétaire décroissant et de la situation économique limitant les marges de manœuvre du partenaire principal AREVA (approximativement 80 % du budget).

L'analyse SWOT des 5 thèmes et une analyse complémentaire TRL des 4 thèmes (hors CLT) positionnent le DTCD en situation médiane sur la chaîne de valeur R&D sauf pour le thème (VIT) où l'activité du DTCD recouvre tous les niveaux TRL, ce qui lui impose de s'associer d'une part à des partenaires universitaires et à d'autres départements de recherche du CEA pour enrichir sa recherche amont et se ressourcer, et d'autre part à la conclusion d'accords de partenariat avec le secteur industriel (AREVA, EDF, ANDRA). Cette étroite imbrication est certes un plus, mais elle requiert de cultiver ces partenariats et réseaux de collaborations.

Dans ce cadre, pour le projet scientifique dans les années à venir, le département affiche une volonté marquée de continuer à développer la caractéristique qui fait sa force principale, à savoir sa capacité à disposer d'une vision totalement intégrée de la filière déchets, permettant d'optimiser la chaîne prétraitement/matrice de conditionnement/procédé/filière de gestion ou exutoire. Face à la nécessité pour un industriel de traiter et de conditionner un déchet radioactif, le DTCD se doit d'être en mesure de proposer le meilleur compromis dans une approche « filière » en termes de volume final de déchets et effluents ou de déchets secondaires générés, de réduction des termes sources, de recours à des procédés existants ou de développements de procédés adaptés, d'adéquation entre la matrice de déchets et ses futures conditions d'entreposage ou de stockage, et bien évidemment en termes de coûts de production et de stockage. Cela requiert une recherche scientifique de haut niveau sur les matériaux de conditionnement des déchets et leur comportement dans le temps et sur les procédés de traitement et de conditionnement des déchets radioactifs solides et liquides. Par ailleurs la nécessité de démontrer qu'il existe des solutions pérennes pour la gestion durable des déchets radioactifs continuera à justifier la stratégie de R&D du département qui vise à asseoir des études de R&D ou opérationnelles sur un socle de recherche scientifique de base, étayée par une politique de publications permettant une validation par ses pairs. Cette approche est même la seule approche possible dans le cadre du thème (CLT) puisqu'il est impossible de reproduire expérimentalement les échelles de temps pertinentes pour la question du stockage géologique. Enfin pour la maîtrise en coûts et délais des chantiers d'assainissement/démantèlement des installations du CEA, les études menées au département doivent proposer des solutions de traitement et de conditionnement pour la reprise des déchets historiques et s'accompagner d'un dossier de connaissances permettant de garantir la compatibilité des colis avec les exutoires identifiés.



Pour ce faire et pour préparer l'avenir et malgré la pression sur les effectifs et les plannings, les activités de recherche scientifique de base et de R&D seront maintenues à un niveau suffisant pour constituer le socle sur lequel se construiront les programmes au-delà de 5 ans. Ainsi le PMLT du LCV avec AREVA est construit pour maintenir les compétences dans la durée et éviter les fortes variations d'effectifs avec une approche : effectif CEA du LCV pour le socle de compétences scientifiques nécessaires et effectif AREVA du LCV adapté aux besoins de R&D de l'industriel. Il est prévu de maintenir l'effort de publication dans les revues ACL, notamment pour le thème (PTH). L'accueil de doctorants sera optimisé selon le processus de cartographie des thèses mis en place au LCV pour identifier les sujets prioritaires et partager ces priorités avec les partenaires industriels afin d'en assurer le financement, et les ingénieurs-chercheurs du département seront incités à soutenir une HDR. Enfin il faut noter l'existence d'une formation en interne CEA sur le traitement et le conditionnement des déchets FA/MA et HA (Faible Activité / Moyenne Activité et Haute Activité) créée en 2013, et qui a pour objectif de présenter la démarche « vision globale des filières déchets » aux ingénieurs-chercheurs du DTCD et aux personnes en charge des projets d'assainissement-démantèlement. Cela constitue un outil important de pérennisation des compétences en assurant une large diffusion des connaissances acquises.

En conclusion la stratégie future de positionnement du DTCD va porter sur l'élargissement de son socle scientifique avec une volonté encore plus marquée de collaborations universitaires, avec le développement de collaborations avec des équipes étrangères et la participation à différents réseaux nationaux et internationaux (USA, Inde, Japon, Allemagne) et elle va porter également sur une tentative d'élargissement du nombre de partenariats industriels nucléaires et hors nucléaire dans les domaines où doivent s'appliquer les nombreuses et diversifiées compétences de sa R&D (extraction solide-liquide, fluides complexes (gels, mousses, fluides supercritiques), OHT (Oxydation HydroThermale), conception de fours de fusion en creuset froid).

La crédibilité de cette stratégie est patente. En réponse notamment à des analyses SWOT et TRL circonscrites par thèmes et parfaitement lucides, cette crédibilité porte en effet sur les nombreux arguments suivants : des missions claires avec une légitimité reconnue en interne et en externe CEA, une démarche de R&D allant de la recherche scientifique de base à l'industrialisation des procédés de traitement et de conditionnement des déchets nucléaires et qui est financée principalement par des partenaires industriels, moyens expérimentaux variés et parfois uniques au monde allant du laboratoire au pilote de procédé ou pré-pilote et des installations MA/HA, l'accès au REX industriel par le biais des partenariats industriels, la capacité à construire une vision pluri-annuelle avec AREVA dans le cadre du laboratoire commun LCV, la richesse et l'ouverture des partenariats universitaires et extra-universitaires, et la capacité d'adaptation et de réorientation stratégique en réponse aux évolutions de l'environnement politique sur la position de l'industrie du nucléaire.

De fait dans un environnement politique complexe et mouvant et de plus dans un cadre financier prévisionnel de décroissance, force est de constater que cette stratégie du DTCD comporte une grande prise de risques budgétaires pour un projet cohérent. Mais avec la compétence et la qualité de ses équipes de recherche scientifique et de R&D et avec la richesse de ses équipements lourds, le département DTCD, un fleuron français pour le traitement et le conditionnement des déchets radioactifs dont certaines activités aval de R&D sont une réussite sans équivalent dans le monde, possède tous les ingrédients pour la mener à bien et ce, avec notamment un renforcement partenarial volontariste à la fois marqué académique (intégration de chercheurs et de post-docs et encore plus d'activités de recherche amont) et marqué industriel pour valoriser le savoir-faire du CEA en génie des procédés hors du domaine nucléaire, notamment dans le domaine du recyclage des matériaux stratégiques (terres rares, métaux critiques...) ou dans le domaine de la remédiation des sols pollués ou du traitement optimisé des déchets industriels.



4 • Analyse thème par thème

Thème 1 : Vitrifiction des effluents de moyenne et haute activité (VIT)

Nom du responsable : M. Christian LADIRAT

Effectifs

Effectifs du thème en Équivalents Temps Plein	Au 30/06/2013	Au 01/01/2015
ETP d'enseignants-chercheurs titulaires		
ETP de chercheurs des EPST ou EPIC titulaires	47,7	43
ETP d'autres personnels titulaires n'ayant pas d'obligation de recherche (IR, IE, PRAG, etc.)	9	7
ETP d'autres enseignants-chercheurs (PREM, ECC, etc.)		
ETP de post-doctorants ayant passé au moins 12 mois dans l'unité		
ETP d'autres chercheurs des EPST ou EPIC (DREM, etc.) hors post-doctorants	1	
ETP d'autres personnels contractuels n'ayant pas d'obligation de recherche		
ETP de doctorants	6	
TOTAL	63,7	50

• Appréciations détaillées

Les programmes de recherche en vitrification du département DTCD sont menés en collaboration avec AREVA sur les verres de confinement, sur le procédé d'élaboration et sur les technologies mises en œuvre. Les objectifs sont (i) la réduction du volume de déchets vitrifiés et de la quantité de déchets technologiques générés, (ii) l'adaptation des procédés de vitrification au traitement des déchets de haute activité anciens, (iii) l'adaptation des procédés de vitrification aux futures solutions de produits de fission issues du traitement des combustibles dont les taux de combustion sont plus élevés que ceux des combustibles actuellement retraités et (iv) l'extension des traitements par vitrification à une plus large gamme de déchets tels que les effluents de faible et moyenne activité de type MAVL, les déchets isolés en faibles quantités et les déchets sans procédé de traitement industriel (iode, sels chlorés) en proposant de nouveaux matériaux de confinement tels que des céramiques et de nouvelles technologies adaptées à la spécificité du déchet traité. Ainsi les développements de vitrification de déchets industriels nécessitent des actions de recherche scientifique de base et de R&D dans les domaines de la formulation des matériaux de confinement, des procédés d'élaboration des matériaux et du développement technologique des briques de base des procédés, notamment des fours de fusion.



Les travaux menés au DTCD sur la formulation et la caractérisation des matériaux de confinement vont de la conception à la qualification de la matrice de confinement à l'échelle procédé et conduisent à l'établissement d'une spécification de colis de déchet. Plus d'un tiers des actions de recherche sont menées dans un contexte académique avec la participation de 5 doctorants. Elles portent sur les phénomènes d'oxydoréduction dans les verres, sur la stabilité thermique et l'homogénéité, la résistivité électrique et le comportement rhéologique des verres fondus et sur le comportement des espèces critiques vis-à-vis de la cristallisation dans les verres de produits de fission à taux de charge accrus par rapport à ceux des verres actuels, telles les terres rares, les actinides, le molybdène et le bore. Des résultats ont été également acquis dans la formulation de céramiques de confinement envisagées pour les déchets sans filière établie de traitement (i.e. confinement de l'iode comme alternative au rejet en mer).

Les travaux sur le développement des procédés d'élaboration de matériaux portent sur le procédé français actuel couplant un calcinateur à un four de vitrification pour l'élaboration de trois verres de composition chimique très différente : un verre de moyenne activité issu d'effluents de rinçage (CSDB), un verre de haute activité de type UMO (utilisé pour conditionner les effluents issus du retraitement des combustibles UNGG) et le verre de haute activité de type UOx actuellement produit industriellement. Pour cela il a été nécessaire de mettre en œuvre et de finaliser le développement industriel d'un four à induction directe en creuset froid permettant l'élaboration de ces trois compositions de verre à des températures comprises entre 1180°C et 1280°C. Ainsi la qualification du procédé d'élaboration est effectuée sur un pilote inactif échelle 1. Elle sert à fixer les domaines des conditions d'exploitation des équipements à mettre en œuvre dans le procédé pour produire un colis de déchets vitrifiés contenant un matériau de qualité prouvée (notamment les conditions de température d'élaboration, d'agitation du verre, et la sensibilité de ces deux paramètres aux conditions d'exploitation), tout en recherchant les conditions de limitation de rejets en maîtrisant la volatilité des radioéléments. A l'issue de la qualification du procédé et après la mise en place de la nouvelle technologie de four par induction directe en creuset froid sur la chaîne B de l'atelier R7 de La Hague en 2009, des actions de soutien à la production industrielle des verres CSDB et UMO ont été effectués par les experts de procédé du DTCD. Des actions d'expertise ou de validation par des essais sur les prototypes échelle 1 du DTCD, pour l'adaptation et l'optimisation du procédé, ont également été conduites pour les 5 chaînes de vitrification des ateliers de La Hague qui comportent un calcinateur couplé à un pot métallique chauffé par induction. Cette méthodologie de vitrification est aussi appliquée pour la vitrification par alimentation directe de solution pour le CEA Valduc avec une technologie spécifique de type « In Can Melter » conçue et mise en œuvre sur le prototype DIVA (Dispositif Instrumenté de Vitrification Avancée). De plus des missions conjointes d'expertise CEA/AREVA ont été réalisées suite à des sollicitations des exploitants de l'atelier de vitrification de l'usine de Sellafield (UK) et des unités de vitrification de Rokkasho-mura (Japon). Elles ont permis une amélioration significative de l'exploitation industrielle de ces ateliers de vitrification. On mentionnera aussi les démonstrations de faisabilité de vitrification en alimentation directe en creuset froid sans étape préalable de calcination qui ont été faites dans le cadre d'un contrat avec le DOE (programme ART) visant à évaluer les technologies étrangères susceptibles d'être mises en œuvre aux USA pour la vitrification des déchets nucléaires liquides des sites de Hanford et de Savannah River.

Les développements technologiques du DTCD ont porté sur la R&D pour la conception et la technologie des fours (pots) de fusion. L'augmentation des taux de combustion en réacteur et la volonté de réduire le volume des déchets vitrifiés produits conduisent à introduire progressivement une plus grande quantité de fines de dissolution de combustible par colis de verre. Pour permettre à partir de 2015 une augmentation de la teneur en fines dans les conteneurs CSDV et une augmentation de la capacité de vitrification du procédé actuellement mis en œuvre, un nouveau pot chaud a été conçu au DTCD, et afin de satisfaire à des objectifs d'homogénéité thermique du bain de verre et de dispersion des matières à la surface des bains de verre, le dimensionnement et la position des internes ont été étudiés à l'aide des modèles thermo-hydrauliques développés au DTCD et des résultats des essais sur des maquettes de similitude hydraulique réalisés au Département de Modélisation des Systèmes et Structures (DM2S-DEN). Ce nouveau pot de fusion a été testé avec succès à l'échelle 1 sur le pilote PEV (Prototype Evolutif de Vitrification) avec des solutions simulées. Les développements technologiques réalisés se sont ensuite concrétisés par la construction d'un creuset froid nucléarisé testé sur le pilote inactif PEV, puis par la construction d'une version industrielle finale réalisée par l'ingénierie de la société SGN, filiale d'AREVA. Il est clair que les essais sur prototype et les développements technologiques des fours de fusion s'appuient sur une activité importante de modélisation numérique en support à l'expérimentation et au dimensionnement des équipements. Ainsi une modélisation 3D des fours à induction a été développée au DTCD en collaboration avec le SIMAP-EMP, l'INP Grenoble (pour la modélisation électromagnétique, thermohydraulique et la compréhension des phénomènes de formation et de coalescence des bulles) via l'accueil de doctorants et avec le DM2S (pour des expériences en similitude hydraulique). Toutes ces études ont conduit de façon remarquable à l'évolution de la forme du pot de fusion métallique suite au constat de l'accumulation des produits froids au centre du pot entraînant une augmentation des temps d'élaboration du verre, et finalement à un gain en capacité de fusion supérieur à 25 %.



Les effectifs affectés au thème (VIT) ont une tendance à la baisse sur la période 2008-2013, ce qui correspond au cycle final de développement et d'industrialisation d'un procédé qui est survenu au cours de la période. L'accueil de doctorants (2 par an) pour la recherche académique et d'étudiants inscrits en DRT (2 diplômes de recherche technologique par an) pour le développement de procédés est resté constant sur la période. Près de la moitié de la production scientifique est constituée de 147 notes et rapports techniques à destination d'AREVA. L'autre moitié est consacrée à 48 publications en collaboration avec des partenaires universitaires dans des revues ACL, 18 soutenances et HDR et 168 communications à des conférences, congrès et workshops. Les partenaires universitaires sont principalement l'ICSM pour l'accomplissement des recherches de base (avec les équipements analytiques MET, MEBE), l'université de Dijon pour le frittage SPS, le CEA-Saclay IRAMIS pour la RMN, l'Université de Lille dans le domaine des verres phosphatiques et le SIMAP-EMP de l'INPG Grenoble dans le domaine des procédés.

Conclusion :

▪ *Avis global sur le thème :*

Le département et le thème (VIT) bénéficient d'une antériorité et d'une expérience de plus de trente ans sur l'utilisation d'une matrice vitreuse pour confiner des déchets radioactifs. A cet héritage s'ajoute une permanente et intense activité de R&D et de développement technologique pendant ces cinq dernières années.

La première conséquence est que ce département se classe en tête au plan mondial pour ce type d'activités. Ce groupe combine de façon linéaire et interactive une recherche de pointe de très haut niveau sur la matrice verre et une activité d'ingénierie verrière unique visant à immobiliser pour des temps géologiques les produits radioactifs dans des colis de verre.

▪ *Points forts et possibilités liées au contexte :*

- la mise au point d'une méthode de fusion du verre par induction réduisant les corrosions et améliorant l'homogénéité. Cette technique appelée creuset froid a été validée et est utilisée par le partenaire industriel AREVA ;
- l'étude de procédés combinés d'incinération/vitrification permettant de vitrifier des déchets de nature complexe. Cette activité se fait à la demande des partenaires industriels ;
- sur le plan organisationnel, toutes ces activités de vitrification du DTCD sont réunies dans le cadre d'un laboratoire mixte CEA/AREVA. Ce laboratoire appelé Laboratoire Commun de vitrification LCV assure indéniablement une forte cohérence et fluidité entre le client AREVA et le développeur CEA ;
- les visites et discussions sur site ont permis de vérifier la qualité et l'originalité des installations. A cela s'ajoutent une grande motivation et ouverture intellectuelle des chercheurs, ingénieurs, techniciens en charge de ces opérations innovantes. Cette observation est le gage d'une évidente adaptabilité du département à répondre techniquement à de nombreux partenaires : agences, autres industriels hors AREVA ;
- l'activité recherche VERRE associée à l'objectif final de confinement est de très haut niveau. Ce groupe a réussi à se faire une excellente image scientifique « hors nucléaire » ;
- l'apport à la connaissance des compositions verrières, des propriétés rhéologiques, des phénomènes de corrosion place les chercheurs du DTCD dans le peloton de tête au niveau mondial des laboratoires de recherche sur le verre ;
- une des explications des succès des personnels du thème (VIT) est clairement associée à leurs très fortes collaborations avec les laboratoires académiques. Cette politique d'ouverture avec bénéfices réciproques doit être saluée ;
- à l'activité verre non actif il convient d'ajouter les remarquables résultats obtenus sur le comportement long terme de verres chargés en radioéléments. De très beaux et remarquables résultats sur les microfissurations, l'auto-réparation du verre sous irradiation ont été obtenus ;
- le LCV doit être considéré comme une référence dans le domaine. Son potentiel de recherche n'a pas de raisons particulières d'être augmenté mais en aucun cas diminué.



▪ *Points faibles et risques liés au contexte :*

- la très grande dépendance des membres du thème (VIT) avec le donneur d'ordre AREVA est un risque. Pour l'instant les relations fluides dans le cadre du LCV semblent garantir une certaine harmonie dans les projets de recherche et leur financement ;
- un des risques majeurs pourrait survenir d'un manque d'air frais en matière d'idées et d'innovation liée à cette situation de monoculture et à cette notion de service à rendre. Cette situation peut aussi à long terme être pénalisante pour AREVA.

▪ *Recommandations :*

Le thème (VIT) du DTCD est en excellente santé et son potentiel de recherche n'a pas de raisons particulières d'être augmenté mais il ne doit être en aucun cas diminué. Toutefois un tarissement et vieillissement des idées ne sont pas à exclure. Les premiers pionniers ont un pied vers la porte de sortie. Il serait bon de trouver les moyens pour ouvrir le département vers d'autres activités industrielles pour diminuer le poids d'AREVA. Ainsi tout en restant fidèle à la vocation nucléaire il serait souhaitable que d'autres secteurs économiques bénéficient du talent des personnels de ce département. Cette ouverture déjà entamée avec tant de succès en direction du monde académique serait un excellent signe envoyé par le CEA vers d'autres communautés. Enfin compte tenu de la qualité des équipes et de leur fort potentiel, il serait également souhaitable qu'une partie du budget et des actions soit laissée à la libre initiative des chercheurs et ingénieurs. AREVA et d'autres partenaires clients devraient être en mesure de prendre en charge cette partie « à risque » de la recherche sans autres espoirs que de maintenir la haute qualité scientifique de leur partenaire de recherche scientifique de base et de R&D. Un ordre de grandeur voisin de 10 % ne paraîtrait pas déraisonnable.



Thème 2 : Procédés thermiques pour le traitement des déchets radioactifs (PTH)

Nom du responsable : M. Roger BOEN

Effectifs

Effectifs du thème en Équivalents Temps Plein	Au 30/06/2013	Au 01/01/2015
ETP d'enseignants-chercheurs titulaires		
ETP de chercheurs des EPST ou EPIC titulaires	28,2	33
ETP d'autres personnels titulaires n'ayant pas d'obligation de recherche (IR, IE, PRAG, etc.)	3	5
ETP d'autres enseignants-chercheurs (PREM, ECC, etc.)		
ETP de post-doctorants ayant passé au moins 12 mois dans l'unité	1	
ETP d'autres chercheurs des EPST ou EPIC (DREM, etc.) hors post-doctorants		
ETP d'autres personnels contractuels n'ayant pas d'obligation de recherche		
ETP de doctorants		
TOTAL	32,2	38

• Appréciations détaillées

Les activités du thème procédés thermiques pour le traitement des déchets radioactifs (PTH) concernent à la fois les besoins internes du CEA (traitement des déchets solides pour le CEA/DAM) par le procédé d'incinération IRIS, le traitement d'effluents liquides pour la DEN par les procédés d'incinération plasma IDOHL et ELIPSE et d'oxydation hydrothermale DELIS, et aussi les besoins externes de traitement de déchets solides pour AREVA par les procédés d'incinération-vitrification SHIVA et d'incinération-vitrification-fusion PIVIC. Les procédés thermiques de traitement de déchets radioactifs concernent des déchets solides ou liquides comportant des éléments organiques et minéraux. Ils ont pour objectif soit d'oxyder la fraction organique du déchet afin d'obtenir un déchet minéral compatible avec des procédés de traitement/conditionnement existants (matrice cimentaire ou vitreuse), soit d'oxyder la fraction organique du déchet, et de confiner dans le même procédé les éléments radioactifs dans une matrice minérale.

Le procédé IRIS (Installation de Recherche en Incinération des Solides) est un procédé qui traite les déchets chlorés chargés en plutonium provenant des boîtes à gants de l'industrie nucléaire. Il comporte deux étapes, une pyrolyse à 500°C pour éliminer les composés gazeux les plus corrosifs et une calcination sous air enrichi en oxygène à 900°C pour assurer la combustion tout en concentrant la contamination dans des cendres qui peuvent être vitrifiées si la récupération du plutonium n'est pas envisagée. Les dernières évolutions sensibles de la technologie et des paramétrages du procédé IRIS sont dues d'une part à des travaux de recherche scientifique de base dans le domaine de la chimie des hautes températures qui ont permis d'éliminer la formation de chlorures métalliques extrêmement corrosifs par introduction de phosphore organique, et d'autre part dans le domaine de la compréhension des phénomènes physico-chimiques engagés lors de la pyrolyse des matières organiques en collaboration avec le centre universitaire RAPSODEE (École des Mines d'Albi Carmaux) qui ont permis un nouveau pilotage de l'installation. L'adaptation de ce procédé au traitement en dilution de nouveaux déchets (résines échangeuses d'ions, boues



d'extraction, solvants usagés) est en cours avec des activités de recherche scientifique portant sur la compréhension de la dégradation thermique et sur la réactivité dans les différents réacteurs de l'installation.

Le procédé DELOS est un procédé d'Oxydation Hydrothermale (OHT) qui consiste en une réaction d'oxydation totale et rapide entre des déchets liquides organiques contaminés (provenant des différentes installations nucléaires de la DEN) et un oxydant (O_2/N_2 en excès stoechiométrique) en milieu eau supercritique. Pour ce faire, le laboratoire des Procédés Supercritiques et de Décontamination du DTCD a conduit différentes études expérimentales sur un banc d'essais inactifs (DELIS), identique à l'unité pilote d'OHT de DELOS installée dans ATALANTE. La stabilité thermique de la réaction d'OHT et l'absence de formation de gaz explosifs sont les défis dans le développement du procédé tout comme l'optimisation de la durée de fonctionnement sans arrêt du procédé. La problématique est assez complexe car lors de la transition supercritique, des sels minéraux contenus dans les déchets liquides précipitent et se déposent sur les internes du réacteur pouvant entraîner une corrosion sous dépôt sous forme d'oxydes. Ainsi l'extrapolation et la durée de fonctionnement du réacteur ont nécessité la compréhension fine de ces mécanismes de précipitation et notamment la connaissance de la thermohydraulique dans ce milieu réactionnel. Une première approche de mécanique des fluides numérique (CFD) a permis d'obtenir une description fine des écoulements et échanges thermiques dans le réacteur. Par ailleurs un programme ambitieux de tests de matériaux a été conduit et a permis d'atteindre 300 heures de fonctionnement en continu avec un solvant modèle chargé en chlorures et phosphates et représentatif d'effluents réels nucléaires à traiter.

Les procédés IDOHL (Installation de Destruction des Organo Halogénés Liquides) et ELIPSE (Élimination de Liquide par Plasma Sous Eau) sont destinés à traiter par oxydation en milieu plasma des effluents liquides avec une charge organique importante. Les principales recherches concernant ces deux procédés s'intéressent à la chimie des plasmas dans lesquels des liquides organiques sont introduits ainsi qu'aux cinétiques de combustion d'une part dans un système aérien chaud (IDOHL) et d'autre part dans une tuyère de torche à plasma dans laquelle les durées de séjour sont de l'ordre de quelques millisecondes (ELIPSE). Pour le procédé ELIPSE la conception, la première modélisation et des essais préliminaires effectués en collaboration avec le Laboratoire de chimie des plasmas de l'Université de Limoges ont permis d'évaluer l'efficacité de destruction des composés organiques à environ 99% pour des produits tels que le mélange TBP-dodécane avec une capacité de traitement de 3L/h. Des programmes de R&D sont actuellement en cours de définition pour mener à bien l'optimisation et la qualification du système de traitement en ligne de la solution aqueuse (refroidissement et filtration) dans laquelle fonctionne le plasma et qui permet de limiter très sensiblement la taille du système de traitement des gaz.

Le procédé SHIVA (Système Hybride d'Incinération Vitrification Avancé) permet d'assurer dans un même réacteur l'incinération en milieu plasma d'oxygène des charges organiques contenues dans les déchets, la post-combustion des gaz issus de la dégradation de ces mêmes organiques et la vitrification des cendres par induction en creuset froid. Ce procédé repose sur le couplage de l'induction en creuset froid et de la technologie des torches à plasma d'arc. Il est adapté au traitement de mélanges de déchets organiques et minéraux de faible et moyenne activité tels que les boues de coprécipitation sulfatées et de zéolithes contaminées en strontium et césium stockées à Fukushima, avec des capacités de l'ordre de 20 kg/h. Les recherches scientifiques de base et de R&D ont porté sur la chimie des hautes températures impliquées dans des processus de dégradation de différents types de substances introduites dans un bain de verre en fusion (phosphatation des chlorures de métaux en milieu sulfates nécessitant des connaissances sur les différents états redox du soufre), sur la technologie des torches à plasma jumelées bipolaires nucléarisées utilisant des électrodes consommables afin d'allonger sensiblement leur durée de vie et de faciliter les opérations de maintenance (durée de fonctionnement sans maintenance des torches à plasma supérieure à 500 heures). Elles ont porté également sur l'électrofiltration des poussières avec des études, réalisées en collaboration avec le laboratoire de génie électrique de l'Université de Pau, le laboratoire EM2C de l'École Centrale de Paris et le laboratoire de génie des procédés de l'ESIGEC (Aix les Bains), qui ont permis d'augmenter notablement l'endurance d'une filtration établie pour un rendement supérieur à 99%.

Le procédé PIVIC (Procédé d'Incinération Vitrification In Can) est un procédé de traitement d'un mélange de déchets métalliques, organiques et minéraux contaminés en actinides (U, Pu, Am) provenant des usines de retraitement et des usines de fabrication de combustible MOX. C'est un procédé séquentiel de traitement par incinération-vitrification : (i) incinération de la fraction organique en milieu plasma d'oxygène en réacteur métallique refroidi et (ii) vitrification des cendres et fusion des métaux par induction en « in can melter » dans un creuset qui sert également de conteneur final et qui sera dirigé vers le site de stockage après reconditionnement. Le procédé conduit à la production d'une matrice mixte, formée de deux phases métallique et vitreuse séparées. Ce procédé a été proposé à AREVA par le Laboratoire Commun de Vitrification (LCV) en 2010 et la R&D est financée par AREVA depuis 2011. Les premières études ont porté sur la conception et la modélisation électromagnétique, thermique, et hydraulique 3D de la partie fusion par induction en « in can melter » et sur le choix d'une famille de verres de confinement des actinides (sodo-calciques) compatible avec le milieu réducteur créé par les déchets métalliques fondus et le creuset en composite à base de SiC. Elles ont porté également sur le contrôle de la vitesse de combustion de sacs entiers de déchets placés dans un panier en fibre de verre avec des essais à échelle 1 kg et il a été vérifié que le concept de sac en fibre de verre permet de



contrôler la vitesse de combustion de la partie organique pour garantir la présence de dioxygène en quantité suffisante et assurer une oxydation complète du déchet. Le livre de procédé pour le projet PIVIC doit être fourni en 2020.

Il faut noter que les compétences acquises par les équipes du thème (PTH) dans le domaine des procédés thermiques de traitement des déchets radioactifs ont été également valorisées dans le domaine du traitement/recyclage de déchets non radioactifs, dans le domaine de la production d'hydrogène par des cycles thermo-chimiques et dans le domaine de la gazéification de la biomasse.

Les effectifs permanents affectés au thème (PTH) ont doublé sur la période 2008-2013 avec une forte proportion d'ingénieurs-chercheurs et de techniciens et relativement peu de personnels non permanents, notamment doctorants et postdoctorants. On constate de plus une augmentation notable des effectifs depuis 2011 due en particulier au démarrage du projet PIVIC. Il n'y a qu'un seul doctorant en 2013 et pourtant il existe un bon encadrement (1 HDR, 1 Expert international CEA et 2 Experts seniors CEA). Mais le nombre de thèses doit augmenter dans les années à venir avec notamment 2 thèses proposées dans le cadre des projets ELIPSE et PIVIC. Les membres du thème (PTH) ont très peu d'activités d'enseignement et la décroissance de ces activités à partir de 2010 s'explique par une évolution du contenu des enseignements répertoriés en thématique « transverse » plutôt qu'en thème (PTH). C'est le cas de la simulation globale des procédés qui concerne les 3 thèmes (DEC, VIT, PTH) respectivement pour les procédés de décontamination, les procédés de vitrification et les procédés thermiques, ou bien c'est le cas de la formulation des matériaux de conditionnement et/ou du traitement d'effluents qui concerne 4 thèmes (DEC, VIT, PTH, CIM) pour l'établissement des relations composition/propriétés ou pour les caractérisations physico-chimiques.

La production scientifique est cohérente avec le profil d'activité du thème qui est en grande partie orienté sur des études scientifiques de base menées en amont des projets plus appliqués de développement de procédés, ces derniers faisant toutefois l'objet de nombreuses notes et rapports techniques industriels. Ainsi près de la moitié de la production est constituée de 34 notes et rapports techniques, en grande partie en diffusion restreinte, capitalisant les connaissances développées dans des programmes principalement à destination des partenaires industriels, majoritairement AREVA. On recense aussi 6 brevets. L'autre moitié de la production est consacrée à la diffusion vers l'extérieur de connaissances ouvertes (souvent acquises dans le cadre de nombreuses collaborations universitaires). On recense ainsi 34 publications dans des revues ACL, 14 communications à des conférences, congrès et workshops et 5 soutenances de thèses.

Les partenaires universitaires sont principalement le Laboratoire de Chimie des Plasmas de l'Université de Limoges pour le développement des procédés chimiques qui mettent en œuvre des plasmas sous les aspects scientifiques (chimie en milieu plasma) et technologiques (torches à plasma d'arc et réacteurs chimiques), le Laboratoire de Génie Electrique de l'Université de Pau pour le développement de la filtration électrostatique de gaz empoussiérés sous les aspects scientifiques (compréhension fine des phénomènes physiques mis en jeu) et technologiques (design de nouvelles électrodes et alimentations électriques plus performantes), le Centre RAPSODEE de l'École des Mines d'Albi-Carmaux pour l'étude de la dégradation des composants organiques dans les procédés de traitement thermique des déchets sous les aspects thermodynamique et cinétique chimiques, le Laboratoire Mécanique, Modélisation et Procédés Propres (L2P2) de l'Université d'Aix-Marseille (AMU) pour la mécanique des fluides, les transferts (par modélisation numérique en particulier) et le génie des procédés dans le procédé OHT des déchets ou de la gazéification de biomasse, et le laboratoire SIMAP de l'INP Grenoble pour le développement de procédés de fusion de métaux par induction. On notera enfin la collaboration avec le Département de Physico-Chimie (DPC) CEA/DEN-DANS/DPC pour l'étude et le comportement des matériaux dans leur environnement dans le procédé OHT de l'installation DELOS (mécanisme de corrosion, réactivité des surfaces et des interfaces).

Conclusion :

▪ *Avis global sur le thème :*

Le thème (PTH) du DTCD est en bonne santé et son potentiel de recherche a toutes les raisons d'être augmenté. En effet ce thème est globalement en croissance sur la prochaine période avec un programme de recherche de base et de R&D comportant des axes de recherches qui ont des objectifs scientifiques et technologiques clairement identifiés. Ainsi on peut citer la montée en puissance du projet PIVIC qui a pour objectif la fourniture à AREVA d'un livre de procédé dans moins de 10 ans, avec l'étude des mécanismes et des cinétiques d'interaction verre-métal réducteur de confinement des actinides et les conditions d'élaboration dans un four de type « in can melter ». On peut citer la poursuite de la R&D sur les procédés d'incinération par plasmas des déchets organiques liquides contaminés dont les objectifs sont pour le procédé IDOHL d'accompagner le démarrage de l'installation active et pour le procédé ELIPSE d'être en capacité de proposer un procédé industriel de traitement des liquides organiques actuellement sans exutoires répondant à la fois à des besoins internes CEA et externes. On peut citer également le redémarrage de la R&D sur le confinement par fusion des déchets de gainage provenant des combustibles REP ou RNR et des fines de dissolution pour



être en mesure de proposer à AREVA une solution compétitive pour les usines futures à l'horizon d'une quinzaine d'années. On peut citer enfin les opportunités sur le confinement par traitement thermique par plasma et vitrification des boues sulfatées et des zéolithes de Fukushima qui nécessitent de mener des activités de recherche portant sur le contrôle de l'état redox du soufre dans un four de fusion de déchets, afin de favoriser son élimination en phase gazeuse.

▪ *Points forts et possibilités liées au contexte :*

- les membres du thème (PTH) disposent d'une forte expérience dans le domaine du développement des procédés thermiques, des matériaux de confinement et de leur comportement à long terme ;
- disposition de REX (Retour d'Expérience) sur les procédés en exploitation industrielle permettant de proposer des procédés innovants de traitement thermique adaptés aux différentes catégories de déchets en attente de traitement et conduisant à des matrices de confinement choisies en fonction de leur niveau d'activité ;
- capacité à construire une vision pluri-annuelle avec AREVA dans le cadre du LCV : exemple du projet de procédé PIVIC. En effet, le partenariat avec AREVA pour la partie PTH est un point positif qui garantit un lien permanent avec l'application industrielle (présent, futur) et une motivation mutuelle (CEA, AREVA), avec des enjeux scientifiques qui sont intéressants à la fois au niveau de la recherche scientifique de base et au niveau de la R&D, et de plus ;
- sur le plan organisationnel, toutes les activités de vitrification du DTCD sont réunies dans le cadre d'un laboratoire mixte CEA/AREVA. Ce laboratoire appelé Laboratoire Commun de vitrification LCV assure indéniablement une forte cohérence et fluidité entre le client AREVA et le développeur CEA, notamment pour le thème (PTH) ;
- le thème (PTH) bénéficie d'équipements lui permettant d'effectuer des recherches dans de très bonnes conditions (pilotes prototypes SHIVA, IRIS, IDOHL, ELIPSE, DELIS, DELOS), sachant qu'il est également possible d'utiliser les outils des autres thèmes au sein de la structure DTCD ;
- très bonnes collaborations avec le monde universitaire français dans les thématiques adaptées et spécifiques du thème (PTH) ;
- compétences acquises dans le domaine des procédés thermiques de traitement de déchets radioactifs qui peuvent être valorisées dans le domaine du traitement/recyclage de déchets non radioactifs, dans le domaine de la production d'hydrogène par des cycles thermochimiques et dans les procédés de gazéification de la biomasse.

▪ *Points faibles et risques liés au contexte :*

- nombre insuffisant de doctorants, malgré la présence d'un bon encadrement potentiel ;
- clause d'exclusivité dans le partenariat avec AREVA avec le risque de limiter les possibilités de collaborations avec d'autres partenaires ;
- temps de cycle très long entre le lancement de la R&D et l'application industrielle : le développement et la qualification d'un nouveau procédé de traitement/conditionnement des déchets est de l'ordre d'une dizaine d'années. Cette durée importante expose le DTCD aux changements de stratégie ou de priorité qui peuvent fragiliser le bon déroulement du projet.

▪ *Recommandations :*

Le thème (PTH) du DTCD est en bonne santé et son potentiel de recherche a toutes les raisons d'être augmenté, non seulement en personnels permanents, mais aussi en personnels non permanents. En effet il faut maintenir les projets à moyen et long terme et éviter le pilotage à court terme, malgré les contraintes industrielles. Cela implique de maintenir les études axées sur la compréhension des mécanismes. Et cela implique également d'augmenter de façon impérative le nombre de thésards et de postdocs.

Par ailleurs, il paraît souhaitable de mieux répartir les tâches (collaborations, enseignements, publications) sur l'ensemble des intervenants du thème, notamment en ce qui concerne les activités d'enseignement. En outre il sera nécessaire de maintenir et d'augmenter les opportunités d'élargissement des applications aux domaines hors nucléaire, ce qui implique une augmentation de la prise de risque en ouvrant les nombreuses expertises du thème (PTH) vers des



projets de rupture hors du nucléaire. Cela permettrait de limiter le risque lié à l'unicité du partenaire industriel (AREVA).

Concernant la recherche scientifique de base, une forte collaboration avec des laboratoires universitaires est indispensable pour avoir accès aux derniers résultats de la recherche fondamentale notamment dans les domaines des plasmas, de la chimie des dégradations thermiques des composés organiques, de la thermohydraulique des métaux fondus et de la structure métallurgique des alliages élaborés et dans le domaine de la modélisation numérique pour les écoulements réactifs complexes avec transfert thermique. Dans ce contexte, il faudra poursuivre la politique menée jusqu'à présent avec les partenaires universitaires et pour ce faire, répétons-le, il doit être entrepris une politique forte d'accueil et d'encadrement d'étudiants en thèse. Ce dernier point pourrait aussi renforcer l'activité de publications dans des revues internationales de haut niveau.

Enfin, il est fortement recommandé d'améliorer la mobilité internationale des personnels ingénieurs-chercheurs, dans la limite de ce que permet la confidentialité des sujets traités.



Thème 3 : Matrices cimentaires pour le conditionnement de déchets radioactifs (CIM)

Nom du responsable : M. Fabien FRIZON

Effectifs

Effectifs du thème en Équivalents Temps Plein	Au 30/06/2013	Au 01/01/2015
ETP d'enseignants-chercheurs titulaires		
ETP de chercheurs des EPST ou EPIC titulaires	14,6	15
ETP d'autres personnels titulaires n'ayant pas d'obligation de recherche (IR, IE, PRAG, etc.)		
ETP d'autres enseignants-chercheurs (PREM, ECC, etc.)		
ETP de post-doctorants ayant passé au moins 12 mois dans l'unité	2	
ETP d'autres chercheurs des EPST ou EPIC (DREM, etc.) hors post-doctorants		
ETP d'autres personnels contractuels n'ayant pas d'obligation de recherche		
ETP de doctorants	4	
TOTAL	20,6	15

• Appréciations détaillées

L'activité «cimentation» (CIM) comporte une dynamique de recherche structurée autour de sa mission principale : la formulation de matériaux cimentaires pour le conditionnement des déchets de faible ou de moyenne radioactivité à l'aide d'études qui portent sur la compréhension des interactions physico-chimiques entre les déchets et la matrice cimentaire. Elle inclut (i) des études sur les ciments silico-calciques conventionnels (performances des matériaux, taux d'incorporation des déchets), (ii) la prospection de liants de constitutions chimiques différentes (géopolymères, ciments alumineux et sulfo-alumineux, ciments phosphatés) qui permettent de formuler des matrices innovantes pour le conditionnement de déchets actuellement sans filière de conditionnement, (iii) le développement de matériaux capables de piéger irréversiblement l'hydrogène de radiolyse dans les colis de déchets en condition de transport ou d'entreposage, (iv) un soutien technique aux exploitants en charge de la gestion des déchets ainsi que la réalisation de missions d'expertises nationales et internationales. Ces différentes activités sont principalement conduites pour les acteurs industriels ou institutionnels majeurs (CEA en tant que producteur de déchets, AREVA NC, EDF, ANDRA).

On recense cinq thématiques structurantes. La première thématique concerne la maîtrise de la réactivité initiale et de la structuration de géopolymères pour le conditionnement des déchets magnésiens utilisés pour la fabrication des gaines de combustibles des réacteurs UNGG. Les études ont permis de définir un matériau satisfaisant l'ensemble des critères d'acceptabilité requis par l'ANDRA pour un colis destiné à un stockage de surface dont l'emploi industriel en tant que matériau d'immobilisation est envisagé à l'horizon 2016. Les études sur les géopolymères ont conduit le DTCD à co-fonder un GIS « Géopolymères, Géocomposites, Géomatériaux à base d'argile » structurant dix équipes de recherche françaises autour des verrous scientifiques et technologiques liés à la formulation et à la chimie des géopolymères. La deuxième thématique porte sur la modélisation thermodynamique de l'évolution minéralogique au cours de l'hydratation de matrices à base de ciment sulfo-alumineux qui suscitent un intérêt croissant de la part de



l'industrie cimentaire, car les rejets de CO₂ associés à leur production sont réduits par rapport à ceux du ciment Portland et ciments qui possèdent également des atouts pour l'inertage de déchets. Les réactions entre les constituants du déchet et les phases cimentaires ou bien l'eau de gâchage ont été précisées, puis leur influence sur la cinétique d'hydratation du liant et sur ses propriétés après durcissement ont été déterminées. Cela a conduit au développement d'une base de données thermodynamiques compatible avec le code de spéciation géochimique CHESS pour décrire les assemblages minéralogiques stables dans les systèmes étudiés et le modèle thermodynamique a ensuite été utilisé avec succès pour décrire notamment l'évolution de l'assemblage minéralogique des enrobés de déchets en fonction du taux d'hydratation du ciment. La troisième thématique concerne l'élucidation des mécanismes de rétention des alcalins par des ciments bas pH développés pour le stockage en profondeur (pH=11 au lieu de pH=13,5 pour un béton conventionnel). Il a été montré que ces ciments peuvent être obtenus à partir de liants binaires (ciment Portland-fumée de silice) ou ternaires (ciment Portland-fumée de silice-cendres volatiles ou laitier de haut fourneau) à faible teneur en ciment Portland. Par ailleurs, la chimie de la solution en équilibre avec les ciments bas pH hydratés a été caractérisée et il a été montré que ce sont les alumino-silicates de calcium hydratés qui jouent le rôle essentiel dans la rétention des alcalins. Le mécanisme mis en jeu est celui d'une compensation des charges négatives des alumino-silicates de calcium hydratés par interaction électrostatique et il existe une sélectivité de sorption conduisant à une meilleure rétention du potassium que du sodium attribuée à une différence d'accessibilité aux interfeuillets des particules d'alumino-silicates de calcium hydratés. La quatrième thématique porte sur l'influence des paramètres de synthèse de piègeurs à hydrogène placés en ciel de conteneur à base d'un mélange d'oxydes MnO₂ et Ag₂O et sur leur capacité de piégeage de l'hydrogène avec la détermination des mécanismes associés. Il a été montré que le piégeage s'effectue par chimisorption de l'hydrogène avec réduction de MnO₂ en MnOOH et une analyse de fonction de distribution de paires avec un équipement de diffraction des rayons X a permis l'identification du précurseur à l'Argent nécessaire au piégeage. A la suite de ces travaux, des études de changement d'échelle en vue d'une production industrielle ont été engagées avec AREVA. Enfin la cinquième thématique concerne la maîtrise de la stabilité dimensionnelle des enrobés cimentaires pour l'inertage des déchets comme les concentrats d'évaporation produits par les stations de traitement des effluents liquides de sites nucléaires (CEA de Saclay et de Valduc), comme les boues de coprécipitation produites par la station de traitement des effluents liquides du centre de Marcoule et comme les résines échangeuses d'ions pour le compte d'EDF et d'AREVA. Les études ont permis de comprendre les processus à l'origine des variations dimensionnelles ou des pressions de gonflement en milieu contraint pour des enrobés de concentrats riches en nitrates conservés sous l'eau et pour des enrobés cimentaires de résines cationiques sous forme sodium ou potassium.

Les effectifs affectés au thème (CIM) ont une tendance à une légère augmentation sur la période 2008-2013. L'accueil de doctorants (2 par an) pour la recherche académique et d'étudiants de Master pour le développement de formulations cimentaires est en légère augmentation sur la période. Près de la moitié de la production scientifique est constituée de 49 notes et rapports techniques à destination du CEA ou partenaires industriels et 5 brevets. L'autre moitié est consacrée à 36 publications en collaboration avec des partenaires universitaires dans des revues ACL, 7 soutenances de thèses et HDR et 37 communications à des conférences, congrès et workshops. C'est une répartition caractéristique d'une recherche scientifique de base et d'une R&D tournée vers l'innovation.

Les partenaires universitaires sont principalement l'ICSM pour l'accomplissement des recherches de base (Équipe de Diffusion et Diffraction), l'Institut de Chimie de Clermont-Ferrand pour ses compétences en analyse du solide, l'École des Mines de Douai pour son expérience sur les ciments alumineux et sulfo-alumineux et l'Université de Bourgogne pour la réactivité des systèmes granulaires.

Conclusion :

- *Avis global sur le thème :*

Au sein du DTCD, le thème (CIM) est le seul qui se confond avec un laboratoire unique, les études du thème CIM étant entièrement menées par les membres du laboratoire LP2C. Cette situation permet de bien circonscrire les activités du thème autour d'actions de recherche de qualité, alliant les aspects scientifiques et technologiques de la cimentation des sous-produits de l'industrie nucléaire. Au cours des cinq années passées, les chercheurs ont effectué des actions de recherche sur des sujets variés. Ils ont notamment consolidé les acquis et connaissances sur les matrices classiques à base de ciment Portland, cette matrice représentant encore une part importante des projets de recherche. Ils ont également développé une série d'actions d'ouverture vers des matrices alternatives, matrices qui pourraient représenter l'avenir de la cimentation de certains sous-produits qui ne trouvent pas encore de débouchés à l'heure actuelle (magnésium métallique par exemple). Les recherches menées ont permis des avancées importantes dans ce domaine, ayant conduit au dépôt de plusieurs brevets et à la publication de plus de 30 articles scientifiques et de nombreux rapports internes.

Le projet à cinq ans, qui porte sur les enjeux concernant l'optimisation des formulations des matrices silico-calciques, le développement de nouvelles matrices de conditionnement et des études sur les propriétés des enrobés de



déchets à moyen et long terme, est pertinent et réalisable, autant du point de vue de la recherche amont que du point de vue technologique.

▪ *Points forts et possibilités liées au contexte :*

- le thème (CIM) regroupe des chercheurs dynamiques couvrant des sujets de recherche variés dans le domaine de la cimentation des sous-produits de l'industrie nucléaire. Il couvre un domaine relativement peu étudié en France, ce qui rend son positionnement stratégique aux niveaux national et international ;
- l'expertise de plusieurs chercheurs du thème (CIM) est sans équivoque, certains ayant une stature internationale ;
- concernant la production scientifique, il existe une recherche d'équilibre entre recherche amont (compréhension des mécanismes) et aval (menant aux applications technologiques). Cet aspect est notamment identifiable pour les études sur les ciments sulfo-alumineux et sur les géopolymères ;
- l'élargissement des activités à des matrices alternatives au ciment Portland est l'une des forces du thème (CIM). Cet élargissement est largement effectif, puisqu'une part importante de la production scientifique est concernée. C'est le cas par exemple pour les ciments sulfo-alumineux (7 publications dans des revues internationales à comité de lecture) et les géopolymères (8 publications dans des revues internationales à comité de lecture) ;
- le thème (CIM) fait état de quelques collaborations productives ayant mené à des échanges dynamiques avec plusieurs autres structures externes étant associées à la production scientifique. Un effort a été fait afin de maintenir des contacts assidus avec ces structures à travers des programmes et groupes d'échange (par exemple GIS, etc.) ;
- bonne activité de dépôt de brevets, 5 entre 2008 et 2012. Cela semble se poursuivre avec 2 dépôts en 2013. Le reste de la production est importante et cela inclut les notes techniques qui sont de grande qualité ;
- la structure bénéficie d'équipements lui permettant d'effectuer des recherches dans de bonnes conditions, sachant qu'elle peut utiliser les outils des autres thèmes au sein du DTCD ;
- d'un point de vue de l'organisation interne, les discussions avec les membres du laboratoire ont laissé apparaître d'excellentes relations entre les chercheurs permanents, doctorants et post-doctorants. Cela garantit le développement d'une ambiance propice à l'échange d'idées entre les chercheurs, selon des schémas "bottom-up" et "top-down" ;
- on note un très bon encadrement des doctorants du thème par les chercheurs du site (2 experts senior et 2 HDR) ;
- certains chercheurs effectuent un nombre important d'heures d'enseignement (cours spécifiques et vulgarisation scientifique, 100h/an). Cette possibilité est étendue aux doctorants.

▪ *Points faibles et risques liés au contexte :*

- l'essentiel des recherches développées concerne la formulation et la réactivité des liants, sujets principalement traités d'un point de vue expérimental. La modélisation des phénomènes demeure restreinte, étant développée essentiellement pour l'aspect réactivité (code CHESS par exemple). Il pourrait être pertinent d'aborder la modélisation à l'état frais (recherche conséquente et pertinente déjà engagée à l'échelle expérimentale) et à l'état durci, soit en interne (inter-thème), soit sous forme de collaborations extérieures (CEA Saclay, autres partenaires universitaires). Dans ce sens, on remarque un certain cloisonnement préjudiciable par rapport aux autres thèmes du DTCD (CLT par exemple, qui développe plusieurs modélisations à long terme) ;
- certains sujets semblent un peu à la marge des activités du thème, légèrement éloignés de la logique scientifique des autres projets traités. Ainsi, des sujets tels que le piégeage de l'hydrogène dans des matrices autres que cimentaires demanderaient à être mieux intégrés dans la démarche scientifique du groupe, afin de conserver une cohérence globale ;
- la valorisation des recherches hors nucléaire demeure assez limitée, contrairement à d'autres thèmes du DTCD pour lesquels plusieurs pistes sont déjà envisagées ;



- une partie importante de la production scientifique repose sur un nombre très limité de chercheurs. Il serait important d'impliquer toute l'équipe afin de pallier une éventuelle baisse de régime ou le départ de l'un de ces piliers ;
- dans le domaine purement cimentaire, la grande majorité des publications sont dans Cement and Concrete Research. Malgré le bon facteur d'impact de ce journal, il serait pertinent de varier les parutions dans d'autres journaux ;
- les collaborations internationales mériteraient d'être mieux développées, certains chercheurs du thème ayant largement la stature pour cela. Il y a peu ou pas de mobilité internationale des chercheurs, ce qui est dommage pour l'avancement de certaines thématiques (les départs à l'étranger de chercheurs pour quelques mois sont reconnus comme étant bénéfiques à l'ensemble des structures) ;
- certains problèmes de financement sont évoqués. Or, il existe trop peu de demandes de type ANR et projets européens. Le thème n'est probablement pas assez impliqué dans le montage de ces dossiers (dans la limite du secret imposé par la position du CEA). Cela permettrait d'améliorer et de varier les sources de financement ;
- le nombre limité de chercheurs dans le thème CIM est propice à établir des échanges internes périodiques sur les sujets transversaux touchant plusieurs projets du groupe. Cet aspect semble pour l'instant assez limité, les projets étant menés indépendamment les uns des autres.

▪ *Recommandations :*

Il convient d'améliorer les études à long terme avec retour d'expérience vers la formulation. Cela pourrait se faire grâce à un renforcement des relations avec le thème CLT, le département DTEC, le CEA Saclay et les intervenants universitaires extérieurs au CEA. Il faut aussi maintenir les projets à moyen et long terme et éviter le pilotage à court terme, malgré les contraintes industrielles. Cela implique de maintenir les études axées sur la compréhension des mécanismes. Par ailleurs il paraît souhaitable de mieux répartir les tâches (collaborations, enseignements, publications) sur l'ensemble des intervenants du thème, car les forces vives sont un peu trop concentrées sur un nombre limité de chercheurs.

En outre, il sera nécessaire de garder ouvertes les opportunités d'élargissement des applications aux domaines hors nucléaire, ce qui implique une augmentation de la prise de risque en ouvrant les nombreuses expertises du laboratoire vers des projets de rupture hors du nucléaire. Cela permettrait de limiter le risque lié au partenaire unique de certaines thématiques.

Enfin, il est fortement recommandé d'améliorer la mobilité internationale des personnels ingénieurs-chercheurs, dans la limite de ce que permet la confidentialité des sujets traités.



Thème 4 : Décontamination de solides et effluents radioactifs (DEC)

Nom du responsable : M. Frédéric CHARTON

Effectifs

Effectifs du thème en Équivalents Temps Plein	Au 30/06/2013	Au 01/01/2015
ETP d'enseignants-chercheurs titulaires		
ETP de chercheurs des EPST ou EPIC titulaires	14,2	15
ETP d'autres personnels titulaires n'ayant pas d'obligation de recherche (IR, IE, PRAG, etc.)	1	1
ETP d'autres enseignants-chercheurs (PREM, ECC, etc.)		
ETP de post-doctorants ayant passé au moins 12 mois dans l'unité	2	
ETP d'autres chercheurs des EPST ou EPIC (DREM, etc.) hors post-doctorants		
ETP d'autres personnels contractuels n'ayant pas d'obligation de recherche	1	
ETP de doctorants	9	
TOTAL	27,2	16

• Appréciations détaillées

Les activités du thème (DEC) sont menées pour répondre aux besoins industriels de décontamination en conditions d'exploitation ou pour la maintenance opérationnelle, pour répondre aux besoins des chantiers d'assainissement et de démantèlement et pour répondre aux besoins des situations post-accidentelles (Fukushima). Elles concernent les procédés de décontamination d'effluents radioactifs (co-précipitation, adsorption en colonne et filtration membranaire) et les procédés de décontamination de solides réactifs mettant en œuvre des fluides complexes (formulation de gels de décontamination, de mousses de stabilisation et décontamination particulaire surfacique en milieu supercritiques assistée par tensioactifs et effets mécaniques). Ainsi pour la décontamination de solides et effluents radioactifs, le DTCD conduit des activités de R&D, visant à améliorer les procédés existants ou à développer de nouvelles solutions technologiques.

Pour la décontamination des effluents, les activités du thème (DEC) portent sur les études des procédés de décontamination par voie physico-chimique mettant en œuvre principalement les opérations unitaires de co-précipitation et de sorption sur solides en colonne, avec 2 radioéléments particulièrement visés, le 90Sr et le 137Cs. Le procédé de co-précipitation constitue le procédé industriel de référence pour la décontamination des effluents liquides de type FA-MA voire HA. Mais ce procédé présente le désavantage de générer des volumes de déchets secondaires (boues après filtration de la suspension co-précipitée) relativement importants, de l'ordre de 1 % du volume d'effluents traité. C'est pourquoi sur la période 2008-2013, les travaux de recherche scientifique de base et de R&D ont eu pour objet de définir des concepts de réacteurs minimisant cette quantité de déchets secondaires : un lit fluidisé et une configuration dite de « réacteur-décanteur ».



Par exemple, pour la décontamination du strontium par co-précipitation au sulfate de baryum, il a été prouvé expérimentalement que le débit d'alimentation en réactif du « réacteur-décanteur » pouvait être abaissé de 40 % (signifiant une diminution du volume de boue d'un facteur 2,5) tout en maintenant un facteur de décontamination de 400, en adéquation avec le besoin industriel. Pour la décontamination des effluents sur sorbants solides, des recherches ont été conduites sur la mise au point de procédés de décontamination basés sur des sorbants minéraux ou hybrides innovants, divisés ou monolithiques placés dans des colonnes, et adaptés au traitement de grands volumes d'effluents de salinité variable. En particulier des sorbants nanostructurés à base d'hexaferrocyanates de métaux de transition ont été élaborés pour la décontamination en césium d'effluents pouvant présenter des salinités élevées et ce, avec différentes équipes du CEA et universitaires aux compétences complémentaires en synthèse des matériaux.

En ce qui concerne la décontamination des solides, les recherches scientifiques de base et de R&D portent sur des procédés mettant en œuvre des fluides complexes, et plus particulièrement les gels, les mousses et les fluides supercritiques. Pour la décontamination des solides par gels, des études fondamentales ont été menées visant à améliorer les connaissances de base relatives au comportement rhéologique de gels auto-séchants aspirables ASPIGEL utilisés pour des opérations de décontamination de grandes surfaces à géométries simples. Ainsi l'influence des ions présents et de la charge minérale des gels sur leurs propriétés rhéologiques a été mise en évidence. Ces résultats permettent à la fois de renforcer les connaissances sur les suspensions en général, mais ils pourront également servir à une meilleure maîtrise des procédés industriels de décontamination utilisant les gels. De même pour comprendre comment l'ajout d'un super-absorbant (à savoir le polyacrylate de sodium (PAANA)) peut améliorer l'efficacité d'un gel de décontamination, un mécanisme a été proposé mettant en évidence le rôle joué par les ions présents en surface du substrat solide à traiter qui diffusent au sein du gel, provoquant ainsi le relargage par effet de pression osmotique de la solution décontaminante contenue au sein des billes de PAANA. Ce phénomène, à l'origine de l'amélioration de l'attaque du substrat et donc de sa décontamination, induit également un abaissement local de la viscosité du gel qui contribue à une meilleure imprégnation de la surface à décontaminer.

Pour la décontamination des solides par mousses, les travaux se sont orientés vers la formulation et l'étude du comportement de mousses à particules, stabilisées à partir de nanoparticules minérales, pouvant également jouer le rôle d'adsorbant des radioéléments. Deux approches ont été développées selon le caractère hydrophile ou hydrophobe des nanoparticules. Dans chaque cas la stabilité de ces mousses a été démontrée et les mécanismes de stabilisation ont été étudiés et explicités, selon les caractéristiques granulométriques, les états d'agglomération et les teneurs en nanoparticules pour des nanoparticules hydrophiles ou selon l'influence des nanoparticules hydrophobes sur les différentes caractéristiques des mousses (morphologie, humidité).

Pour la décontamination des solides en milieu CO₂ supercritique avec recyclage du CO₂, les travaux menés en collaboration avec le Pôle Universitaire Balard de Montpellier se sont concentrés sur la compréhension du couplage entre les effets hydrodynamiques imposés par l'agitation (mécanique ou ultrasonore) et les effets physico-chimiques imposés par les co-polymères tensioactifs (formation de micelles) pour trois familles de polymères amphiphiles : copolymères hydrocarbonés, siloxanés et fluorés. Il a été montré que l'agitation joue un rôle primordial en réduisant la taille des agglomérats de particules, facilitant ainsi leur stabilisation par la formation de micelles par les copolymères en milieu CO₂ supercritique. Il faut noter qu'un intérêt particulier a été porté à la fois à la mesure expérimentale, à la modélisation moléculaire avec l'utilisation du modèle PC-SAFT et à la prédiction des solubilités de ces copolymères en milieu supercritique. L'influence des caractéristiques des copolymères, à savoir leur nature et structure (à bloc, à gradient ou greffés), leur composition (masse molaire, répartition entre groupements CO₂-philes et CO₂-phobes, nombre de chaînes greffées) a été évaluée. Les copolymères les plus adaptés en milieu CO₂ supercritique, qui présentent des solubilités suffisantes pour travailler à des pressions modérées (<160 bars), ont pu ainsi être identifiés.

Les effectifs permanents affectés au thème (DEC) ont une tendance à une légère augmentation sur la période 2008-2013 avec un équilibre ingénieurs-chercheurs/techniciens. L'accueil de doctorants et post-doctorants (3 à 5 par an) pour la recherche académique et de DRT ou DRI (2 à 3 par an) pour le développement de procédés est en forte augmentation. 13 thèses ont été soutenues sur la période avec un effort d'encadrement important (2 HDR, 2 Experts senior CEA et 2 Experts CEA).

La production scientifique est cohérente avec le profil d'activité du thème qui est majoritairement orienté R&D appliquée à finalité industrielle à court et moyen terme ou plus prospective en relation privilégiée avec AREVA, et une recherche scientifique de base en support des activités de R&D appliquées. Près de la moitié de la production scientifique est constituée de 73 notes et rapports techniques à destination du CEA ou partenaires industriels et de 13 brevets (30 % des brevets du DTCD). L'autre moitié est consacrée à 28 publications en collaboration avec des partenaires universitaires dans des revues ACL, 13 soutenances de thèses et HDR et 28 communications à des conférences, congrès et workshops. C'est une répartition caractéristique d'une recherche scientifique de base et d'une R&D tournées vers l'innovation.



Les partenaires universitaires sont principalement l'ICSM pour la conception et l'élaboration d'adsorbants innovants appliqués à la décontamination des effluents nucléaires, le Laboratoire Mécanique, Modélisation et Procédés Propres (LM2P2-Université d'Aix-Marseille) pour les procédés d'extraction et de fractionnement en CO₂ supercritique et en eau supercritique et filtration membranaire, le Laboratoire Réactions et Génie des Procédés (LRGP ENSIC/Université de Lorraine, Nancy) pour les procédés de co-précipitation et les études de rhéologie de gels, l'Institut Européen des Membranes (IEM Montpellier) pour l'élaboration de matériaux minéraux nano-structurés (membranes, adsorbants).

En plus des partenariats industriels nucléaires (principalement avec AREVA) et hors nucléaire (DIAM BOUCHAGE, Start-up DFD (Dense Fluid Degreasing), plateforme technologique MATCOS pour les technologies des fluides supercritiques), les personnels du thème (DEC) participent à deux réseaux scientifiques nationaux, le Club Français de Membranes (CFM) et l'Innovation Fluides Supercritiques (IFS) qui organisent notamment des workshops internationaux, des formations et des journées de promotion et de vulgarisation scientifique. Il faut souligner les expertises nationales (pour OSEO et CISDI) et internationales (IRID-AIEA, Japon) effectuées par les membres du thème (DEC).

Conclusion :

- *Avis global sur le thème :*

Il est évident que la décontamination est un thème d'une extrême importance, non seulement au niveau académique et pour le domaine nucléaire, mais aussi dans de nombreux autres secteurs industriels, en France et dans le monde entier. Les ingénieurs et chercheurs qui animent le thème (DEC) sont des spécialistes capables de mener à bien cette recherche à très haut niveau. Ils ont aussi prouvé qu'ils sont prêts à mettre leurs connaissances à la disposition d'autres industries. La décontamination du liège en est un exemple original et remarquable de transfert de technologie comme il est souhaitable d'en rencontrer à l'avenir au CEA.

Le projet à cinq ans est pertinent et réalisable autant des points de vue recherche amont que R&D. Il porte sur les enjeux qui concernent la diminution des impacts chimiques et radiologiques (quantité de réactifs, rejets), la capacité à répondre à des situations accidentelles et les optimisations physico-chimiques des matériaux et des méthodologies de mise en œuvre.

- *Points forts et possibilités liées au contexte :*

- la pluridisciplinarité surtout dans le domaine de la physicochimie des colloïdes et systèmes complexes et la volonté d'aller au-delà des applications purement nucléaires. Ce dernier point devra se développer encore plus dans les années futures. Il est à espérer que ce thème et l'expertise liée au sein du département se feront connaître et apprécier encore plus à l'extérieur du CEA ;
- le thème de la décontamination est bien situé pour renforcer l'image de marque du CEA dans la société civile ;
- les animateurs du thème (DEC) sont surtout internationalement connus pour la thématique portant sur les fluides supercritiques, mais ils participent régulièrement à des journées thématiques et au GDR « Mousses et Emulsions » ainsi qu'à des projets collaboratifs nationaux (ANR, FUI, PCRD). Et bien qu'ils ne soient pas très connus dans la communauté universitaire des gels et des mousses, ils se sont montrés capables de transformer les connaissances scientifiques publiées en des produits de nettoyage d'effluents très originaux ;
- très bonnes interactions avec l'environnement social, économique et culturel (Contrat avec AREVA, plateforme préindustrielle Extraliens, plateforme matériaux MATCOS, création d'une start-up DFD, démonstrateur préindustriel pour le recyclage d'huiles mécaniques, expertise au profit d'OSEO, participation à la cellule interministérielle de conseil et d'animation sur la décontamination des infrastructures, des transports et de l'environnement et lauréat des Trophées INPI de l'innovation 2010) ;
- les animateurs du thème (DEC) sont en collaboration étroite avec les collègues des autres thèmes. De plus, ils sont capables non seulement de satisfaire aux demandes de la contamination nucléaire, mais bien au-delà, de mettre leurs expertises aux services de nombreux autres domaines d'applications. Pour cet aspect d'ouverture vers le monde industriel au sens large du terme, ce thème est plus avancé que les autres thèmes du département ;
- au niveau de la formation par la recherche, il est évident que l'excellent environnement scientifique (à la fois les locaux et l'expertise des ingénieurs-chercheurs permanents) garantit un encadrement des étudiants de grande qualité. Une éventuelle faiblesse au niveau des liens avec les écoles doctorales lointaines est compensée par les cours offerts spécialement aux étudiants en thèse à Marcoule. Les étudiants peuvent



également participer de manière satisfaisante à des congrès nationaux et internationaux. Par ailleurs, il est important de souligner que les animateurs du thème sont aussi impliqués, en nombre d'heures significatif, à l'enseignement dans diverses formations dans des établissements académiques (70h/an) ;

- l'acceptation du projet DEMETERRES financé par le PIA (coût de 19M€) trace déjà les grandes lignes de recherche dans les trois ans qui viennent. Bien que les deux grands industriels impliqués dans le projet, à savoir AREVA et VEOLIA aient certainement leurs propres intérêts dans cette collaboration, les enjeux scientifiques, tels qu'ils sont définis dans le dossier d'évaluation, sont tout à fait intéressants, à la fois au niveau de la recherche scientifique de base et au niveau de la R&D. Surtout, les thématiques « Décontamination des solides par gels » et « Décontamination des solides par mousses » garantissent une continuation de la politique d'ouverture de la recherche du thème (DEC) au-delà d'une application restreinte dans le domaine nucléaire, sans toutefois négliger ce dernier. On peut aussi s'attendre à des beaux résultats dans les deux autres thématiques, notamment la décontamination des effluents par co-précipitation et sur sorbants solides et la décontamination des solides en milieux CO₂ supercritique. A noter aussi la volonté de collaboration avec d'autres unités de la DEN (DRCP, DCP) pour une meilleure compréhension de la spéciation des molécules et une simulation globale des procédés mis en jeu en vue de leur optimisation technico-économique.

- *Points faibles et risques liés au contexte :*

- le projet ANR et la forte implication de l'AREVA limitent un peu l'élargissement des applications possibles. Mais ce constat est encore plus valable pour les autres thèmes du DTCD. Toutefois le cadre ANR donne une certaine indépendance et un soutien conséquent à la recherche scientifique de base ;
- les animateurs du thème (DEC) ont déjà prouvé qu'ils sont capables d'aller au-delà du nucléaire sans avoir un budget important à cette fin. Cependant un risque réside dans le domaine des recherches conduites qui est très large, depuis les divers aspects de la physico-chimie des colloïdes jusqu'aux procédés impliquant l'extraction par le CO₂ supercritique. Par rapport à la taille de l'équipe, il n'est pas évident de rester au top de la R&D dans tous ces domaines.

- *Recommandations :*

Les membres du thème (DEC) devront continuer à étendre les domaines d'application de leur expertise et la mettre à la disposition d'autres secteurs industriels hors nucléaire. En ce qui concerne l'interaction avec l'environnement sociétal, le thème « décontamination » peut renforcer l'image de marque du CEA comme organisme de haute technologie au service de la société, à condition qu'une certaine publicité soit envisagée.

Concernant la recherche, une forte collaboration avec des laboratoires universitaires est indispensable pour avoir accès aux derniers résultats de la recherche fondamentale dans les domaines de colloïdes et fluides complexes. Dans ce contexte, une politique forte d'accueil et d'encadrement d'étudiants en thèse est également indispensable et doit être encore amplifiée. Ce dernier point pourrait aussi renforcer l'activité de publications dans des revues internationales de haut niveau.



Thème 5 : Comportement à long terme des colis de déchets radioactifs (CLT)

Nom du responsable : M. FREDERIC ANGELI

Effectifs

Effectifs du thème en Équivalents Temps Plein	Au 30/06/2013	Au 01/01/2015
ETP d'enseignants-chercheurs titulaires		
ETP de chercheurs des EPST ou EPIC titulaires	33,2	30
ETP d'autres personnels titulaires n'ayant pas d'obligation de recherche (IR, IE, PRAG, etc.)	2	1
ETP d'autres enseignants-chercheurs (PREM, ECC, etc.)		
ETP de post-doctorants ayant passé au moins 12 mois dans l'unité	2	
ETP d'autres chercheurs des EPST ou EPIC (DREM, etc.) hors post-doctorants		
ETP d'autres personnels contractuels n'ayant pas d'obligation de recherche		
ETP de doctorants	7	
TOTAL	44,2	31

• Appréciations détaillées

Les études relatives au comportement à long terme des colis de déchets radioactifs (CLT) concernent les matrices vitreuses et bitumes mais aussi les combustibles usés (CU). Elles sont menées en lien avec les partenaires industriels et institutionnels (AREVA, EDF, ANDRA) et constituent le premier maillon de l'évaluation de sûreté d'un stockage. L'objectif est de qualifier le CLT des différents types de colis (verres, bitumes, CU) vis-à-vis de l'auto-irradiation, la stabilité thermique et la lixiviation. Ainsi les travaux menés ont permis d'élaborer des modèles d'évolution pour tous les types de colis au cours de l'altération et de décrire leur comportement vis-à-vis de l'irradiation.

Les activités de recherche sur les verres ont porté sur l'effet de l'auto-irradiation et de la production d'hélium, sur la fracturation initiale, sur la cinétique d'altération et l'effet de l'environnement et sur les modélisations et validations à long terme. Les effets du dommage de l'irradiation et de la production d'hélium induits par les décroissances alpha dans les verres de confinement des actinides mineurs et des produits de fission de type verre borosilicaté ont été étudiés au travers d'études sur les verres dopés au 244Cm ou par des irradiations externes avec des ions lourds ou légers. Simultanément des études de simulation moléculaire du dommage balistique ont apporté une compréhension à l'échelle atomique des évolutions des propriétés macroscopiques observées. Ainsi il a été démontré que les évolutions structurales des verres sont induites par les interactions nucléaires associées au noyau de recul produit lors de la décroissance alpha, privilégiant le dommage balistique et non électronique. De fait cette évolution est provoquée par la reconstruction du réseau vitreux désorganisé par la cascade de déplacement induite par le noyau de recul figeant ainsi une structure vitreuse de plus haute température fictive et caractérisée par une enthalpie plus élevée. Le comportement de l'hélium a également été étudié en mesurant les constantes de solubilité et les coefficients de diffusion. La formation de fissures n'a jamais été observée dans les régions où des bulles d'hélium ont parfois été détectées, synonyme d'absence d'évolution des propriétés macroscopiques et du maintien de l'intégrité du verre. Les activités concernant la fraction initiale des blocs de verre, due au relâchement des contraintes internes créées



par les conditions de refroidissement des colis qui augmentent leur surface d'accessibilité à l'eau et la quantité de radioéléments relâchés dans l'environnement ont porté sur l'estimation de cette surface par des essais de lixiviation ou par des mesures physiques directes. Basée sur une modélisation thermomécanique qui vise à obtenir le taux de fracturation en fonction des paramètres des scénarios thermiques et sur une modélisation chimie-transport dans les fissures, la surface fracturée a ainsi été calculée sur un bloc échelle 1 en fonction des paramètres du procédé de vitrification (nombre de coulées, type de procédé (creuset froid, pot de fusion)). Les contraintes lithostatiques et la radioactivité se sont révélées avoir un effet du second ordre et la simulation a montré que le type de procédé de vitrification influençait notablement le taux de fracturation en passant d'environ 100 en pot de fusion à environ 20 en creuset froid. Les études sur l'ampleur des mécanismes d'altération mis en jeu (interdiffusion, hydrolyse, formation de la pellicule d'altération) et la cinétique d'altération des verres qui en découle (vitesse initiale d'altération puis chute de vitesse et atteinte d'une vitesse résiduelle) ont porté sur l'influence de l'environnement (produits de corrosion métalliques du conteneur et du surconteneur, barrière argileuse, eau de site, environnement cimentaire...). L'ensemble des différents mécanismes d'altération, fortement couplés, a nécessité la mise en œuvre de modèles à même de décrire la géochimie et le couplage avec le transport au sein de la pellicule d'altération des espèces contribuant à l'altération, notamment les espèces hydrogénées. Les modélisations et validations à long terme (calculs de performance) ont concerné la modélisation des cinétiques d'altération des verres à partir de la connaissance des paramètres cinétiques et thermodynamiques de la couche d'altération, à l'aide du modèle GRAAL (Glass Reactivity taking into Account Alteration Layer) développé à partir de 2008 au LCLT. Ce modèle est implémenté dans un code géochimie-transport (Chess-Hytec) de l'École des Mines de Paris pour décrire chimiquement la pellicule d'altération du verre, son caractère passivant et prendre en compte la précipitation de phases secondaires. Appliqué aux géométries et aux échelles du temps de stockage géologique, il a été utilisé pour calculer la vitesse d'altération, la composition de la couche amorphe et de la solution d'altération en chaque point de l'espace et du temps en prenant en compte la diffusion/convection dans l'environnement des éléments issus de l'altération du verre.

Les activités de recherche sur le comportement à long terme des combustibles usés ont porté sur l'altération des combustibles MOX sous radiolyse gamma en eau pure aérée et sur le comportement de l'hélium dans les UOX. Des expériences de lixiviation ont été réalisées dans des conditions représentatives d'un entreposage à différents pH en couplant l'analyse chimique et radiochimique des solutions à des caractérisations de la surface par spectroscopie Raman. Elles ont montré la bonne stabilité des amas enrichis en plutonium vis-à-vis de l'oxydation sous radiolyse comparativement à la matrice UO₂ englobante. Par ailleurs des études expérimentales ont porté sur le comportement de l'hélium dans des analogues naturels du combustible irradié (uraninites) et sur des pastilles dopées de ²³⁸PuO₂ présentant différents niveaux d'endommagement susceptibles de modifier les propriétés de diffusion de l'hélium. Les expériences réalisées sur les échantillons dopés au plutonium semblent indiquer une accélération de la diffusion de l'hélium attribuée à la formation des lacunes d'uranium et la plupart des atomes d'hélium accompagnent une lacune d'uranium dans sa migration.

Les activités de recherche sur le comportement à moyen long terme des bitumes concernent le gonflement des bitumes sous l'effet de la radiolyse et la lixiviation libre ou sous contrainte. Un des paramètres clé dans l'évaluation du taux de gonflement de l'enrobé bitumineux est la détermination du comportement rhéologique sous irradiation puisque ce comportement est modifié du fait de modifications structurales (réticulations, scissions...) et il conditionne le processus de migration de bulles générées par radiolyse. Dans ce cadre, une loi empirique reliant l'évolution de la viscosité avec la dose d'irradiation a été proposée, fondée sur les évolutions structurales à l'échelle mésoscopique. Le but final est la compréhension de l'influence des faibles débits de dose d'irradiation sur les propriétés macroscopiques et le raffinement du modèle de gonflement utilisé, avec intégration de la coalescence des bulles. Par ailleurs en condition de stockage, l'enrobé bitumineux (constitué de 60 % en masse de bitume et de 40 % en masse de sels de coprécipitation) est susceptible de relâcher des éléments radioactifs sous l'effet de la lente pénétration de l'eau. Des études de RMN couplées à des photos obtenues avec le microscope électronique à balayage environnemental ont permis de montrer que la vitesse de progression de l'eau est plus rapide lorsque le réseau des sels est constitué de grains insolubles et qu'à l'inverse dans le cas de sels solubles, la reprise en eau est plus importante mais le front de dissolution reste localisé à l'interface.

Les effectifs permanents affectés au thème (CLT) ont une tendance à une légère augmentation sur la période 2008-2013 avec une forte proportion d'ingénieurs-chercheurs et de personnels non permanents, principalement doctorants. L'accueil de doctorants et post-doctorants (6 à 15 par an) pour la recherche académique est important mais en légère baisse sur la période avec un effort d'encadrement important (5 HDR (Université de Montpellier 2), 2 directeurs de recherche CEA, 5 Experts seniors CEA). Les membres du thème (CLT) participent à 40 à 60 heures d'enseignement dans les grandes écoles d'ingénieurs et universités.

La production scientifique est cohérente avec le profil d'activité du thème qui est en grande partie orienté sur des études scientifiques de base menées en amont des projets plus appliqués, ces derniers faisant toutefois l'objet de nombreuses notes et rapports techniques. On recense 114 publications en collaboration avec de très nombreux partenaires universitaires dans des revues avec ACL, 175 communications à des conférences, congrès et workshops, 19



soutenances de thèses et HDR et 168 notes et rapports techniques. Il faut signaler la présence importante des personnels permanents et non permanents dans des congrès nationaux et internationaux qui traduit une volonté d'échanges avec la communauté scientifique dans le domaine (CLT). Les partenaires universitaires sont principalement l'ICSM pour les analyses physicochimiques, l'Université de Montpellier 2 pour les activités de modélisation atomistique et des propriétés aux interfaces dans le domaine des verres, l'Institut de Minéralogie et de Physique des Milieux Condensés (UPMC-Paris), les Universités de Strasbourg et de Nancy pour les travaux relatifs aux analogues naturels et archéologiques utilisés comme éléments de validation à long terme des modèles du thème (CLT), l'École des Mines de Paris pour le développement de la modélisation géochimique et du couplage du code de chimie-transport Hytec avec le modèle GRAAL. Il faut signaler l'important programme lié à la fracturation thermomécanique mis en place avec trois laboratoires : LMS (École Polytechnique), LG (ENS-Ulm) et ICUBE (Université de Strasbourg).

Les collaborations internationales sont nombreuses : on mentionnera le groupe de réflexion international sur la recherche d'un consensus sur les mécanismes d'altération des verres en situation de stockage géologique (17 laboratoires en France, USA, Japon, Allemagne, Belgique et Royaume Uni), la participation au CRP AIEA sur le thème CLT, les expertises effectuées par les membres du (CLT) sur les travaux relatifs au stockage des déchets à haute activité à vie longue HA-VL du SCK-CEN, Belgique, sur l'évaluation du site de stockage suédois des combustibles usés et des programmes du DOE (USA). On mentionnera aussi la participation à plusieurs projets européens qui ont permis au DTCD de tisser des liens avec d'autres installations disposant de moyens chauds comme l'ITU Karlsruhe (Allemagne).

Conclusion :

- *Avis global sur le thème :*

Les activités scientifiques et de R&D menées dans le thème (CLT) sont évidemment très importantes car elles sont liées aux divers axes du schéma conditionnement/enfouissement. L'incorporation du thème (CLT) dans le département DTCD paraît logique et favorable au (CLT) en permettant ou mettant en évidence les interactions avec les autres groupes de recherche du DTCD.

Le ratio nombre de personnels permanents / thésards paraît bon.

L'importance accordée aux publications (journaux, actes de congrès) et à l'enseignement semble tout à fait justifiée et nécessaire. De plus, la production scientifique (publications, actes de congrès) est remarquable.

Mais une question d'ordre général se pose, à savoir : pourquoi est-ce que les études portant sur le comportement à long terme des ciments ne sont pas incorporées dans le DTCD et existe-t-il suffisamment d'interactions entre ces études et le (CLT)?

- *Points forts et possibilités liées au contexte :*

- présence d'experts de très grande réputation internationale dans différentes thématiques abordées dans le thème (CLT) et tout spécialement dans la partie "verres" ;
- le thème (CLT) dispose d'une expertise scientifique incontestable pour les processus fondamentaux des matrices de verre et pour les combustibles usés ;
- reconnaissance internationale et participation active dans des réseaux internationaux, participation qui s'est accrue pendant la période de l'évaluation AERES (2008-2013) ;
- un grand nombre de publications d'excellente qualité ;
- un nombre important de thèses soutenues et en cours. L'offre importante de thèses autorise entre autres le recrutement de très bons jeunes chercheurs. Cela permet d'étudier des aspects scientifiques fondamentaux, ce qui est réellement nécessaire pour comprendre les phénomènes importants intervenant dans le comportement à long terme des colis de déchets radioactifs. A titre d'exemples patents, on citera les activités de recherche scientifique de base sur la fracturation des colis de verre, sur la vitesse de dissolution résiduelle des verres, et sur l'interaction des verres avec le milieu d'enfouissement ;
- l'importante participation aux programmes éducatifs à différents niveaux ;
- le partenariat avec AREVA pour la partie CLT est un point positif qui garantit un lien permanent avec l'application industrielle (présent, futur) et une motivation mutuelle (CEA, AREVA).



▪ *Points faibles et risques liés au contexte :*

- les études devraient concerner davantage l'impact des matériaux d'enfouissement (argilites, produits de corrosion, etc.) sur le comportement à long terme des verres et combustibles usés. Cet impact concerne la durée de vie de ces matrices, et par conséquent les calculs de sûreté de l'enfouissement ;
- les activités de recherche portant sur le comportement à long terme des bitumes ne sont pas décrites de façon suffisamment claire. Certes, dans la présentation, des informations sont données sur le gonflement et les autres actions expérimentales, mais elles sont proposées sans données pratiques. Il manque une présentation de la stratégie adoptée et des objectifs futurs, par exemple quelle approche sera suivie pour pouvoir calculer la durée de vie des fûts bitumés dans les conditions d'enfouissement, ou bien est-ce que la durée de vie n'est pas un critère pour les bitumes ? ;
- pour la thématique concernant les combustibles irradiés, la description du programme (présentation orale, dossier d'évaluation) se présente sous la forme d'une série d'actions, mais il manque une présentation d'ensemble : on est en droit de s'interroger sur l'objectif (final) à atteindre. En supposant que cet objectif soit la compatibilité avec le concept d'enfouissement et la durée de vie dans le milieu d'enfouissement, il manque alors une précision sur la stratégie adoptée par le thème (CLT). Il faudrait par exemple insister sur le pourquoi des expériences rapportées, et sur le lien avec le contexte international (par exemple avec les conclusions du projet MICADO (CEC)) ;
- le fait que le groupe qui étudie le comportement à long terme du ciment se trouve sur le site de Saclay (contrairement au groupe "laboratoire de Physico-Chimie des matériaux cimentaires" (CIM) et au groupe (CLT) qui sont situés à Marcoule) n'est pas propice à créer des interactions et collaborations intenses (favorisant un "output" maximal) ;
- l'aspect "fracturation" des colis de verre démontre une qualité de recherche excellente, mais dans les différentes présentations et rapports il manque une indication uniforme du facteur de fracturation. Parfois la valeur de 40 est proposée, parfois 95 ou 50. Il est clair qu'il existe une incertitude sur la valeur de ce facteur, mais le message émis par le thème (CLT) pourrait être plus uniforme.

▪ *Recommandations :*

Il faut continuer à investir dans les doctorats et stages d'étudiants et de façon générale dans la formation par la recherche.

De même, il est conseillé de maintenir le très bon niveau de publications (journaux internationaux avec peer review et proceedings de conférences internationales). En effet, on constate une pression de la part du CEA pour publier notamment dans des journaux internationaux. Mais en observant et appréciant l'existence de cette tradition constructive d'effort de publication, parfois au détriment de l'originalité des résultats, il est recommandé de considérer également la qualité (et/ou l'originalité) des publications en même temps que la quantité.

En ce qui concerne la recherche scientifique de base, il est conseillé de mettre l'accent sur l'impact du milieu d'enfouissement dans les études (verres, combustibles usés, bitumes). Plus spécifiquement pour la partie verres et l'interaction avec le milieu d'enfouissement (argilites et produits de corrosion), il faudrait être plus proactif. Il conviendrait d'élaborer des propositions sur la vitesse résiduelle du verre en milieu d'enfouissement pour comprendre les différents mécanismes contrôlant cette vitesse afin de calculer au final avec des modèles mécanistiques la durée de vie des colis de verre. De même pour l'interaction des colis de verre avec une solution pure, le modèle GRAAL devrait être développé jusqu'à produire les durées de vie des colis, avec la compréhension des différents mécanismes contrôlant la vitesse résiduelle. Toujours pour le verre, mais cette fois pour la fracturation des colis de verre, des propositions devraient être faites pour conduire à une valeur unique et uniforme du facteur de fracturation. Par ailleurs, pour la partie comportement à long terme des bitumes et des combustibles irradiés, il manque la présentation de la stratégie adoptée et des objectifs futurs justifiant la série des activités scientifiques et de R&D menées et à venir.



5 • Déroulement de la visite

Dates de la visite :

Début : Lundi 9 Décembre à 13h30

Fin : Mercredi 11 Décembre à 12h30

Lieu de la visite : Marcoule

Institution : CEA

Adresse : Bagnols/ Cèze

Locaux spécifiques visités :

- HERA (Hall d'essais pour l'Entreposage de matières Radioactives) : plateforme fluides supercritiques et cimentation
- CD (Conditionnement des déchets) : Formulation, Procédés de vitrification (PEV) et d'incinération (SHIVA et ELIPSE) et CLT
- DHA (Déchets à Hautes Activités) : Combustibles irradiés, Spectrométrie Raman, Lixiviation des verres actifs.

Il faut signaler et souligner l'excellente et remarquable organisation de ces visites, avec des explications sur tableaux ou vidéos, suivies de visites et périodes de questions/réponses.

Déroulement ou programme de visite :

Lundi 9 décembre

12h00 - 13h30	Repas	
13h30 - 14h30	Présentations DISN et Centre	J.M. Morey, G. Bordier
14h30 - 15h30	Présentation générale DTCD : bilan	L. Paradis
15h30 - 15h45	Pause	
15h45 - 16h45	<p><u>Décontamination de solides et effluents radioactifs</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Présentation générale • Couplage entre rhéologie et physico-chimie pour la formulation des gels de décontamination 	F. Charton F. Goettmann
16h45 - 17h45	<p><u>Visite HERA (LPSD + LP2C)</u></p> <p>Plateformes fluides supercritiques (F. Charton)</p> <ul style="list-style-type: none"> • MATCOS • Décontamination par CO2 supercritique • Oxydation hydrothermale (DELIS) <p>Cimentation (F. Frizon)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Démo si possible 	V. Blet, F. Charton, F. Frizon
17h45 ->	Debriefing AERES huis clos	Evaluateurs


Mardi 10 décembre

8h00 - 9h00	<u>Procédés thermiques pour le traitement des déchets radioactifs</u> <ul style="list-style-type: none"> Présentation générale Echanges redox entre le verre et le métal (procédé PIVIC) 	R. Boen A. Laplace
9h00 - 10h20	<u>Vitrification des effluents de moyenne et haute activité</u> <ul style="list-style-type: none"> Présentation générale Réactivité chimique dans les bains de verre 	C. Ladirat S. Schuller
10h20 - 10h35	Pause	
10h35 - 12h30	<u>Visite CD : vitrification, incinération-vitrification, formulation, Comportement à long terme</u> <ul style="list-style-type: none"> Formulation (O. Pinet, I. Giboire,) Procédés (vitrif (PEV) et incinération (SHIVA et ELIPSE) (J. Lacombe, F. Lemont) CLT (F. Angeli, N. Godon, S. Gin) 	L. Sauvage, B. Lorrain, O. Pinet, I. Giboire, J. Lacombe, F. Lemont, F. Angeli, N. Godon
12h30 - 14h00	Repas	
14h00 - 15h00	<u>Matrices cimentaires pour le conditionnement</u> <ul style="list-style-type: none"> Présentation générale Nouveaux liants sulfoalumineux 	F. Frizon C. Cau-dit-Coumes
15h00 - 16h00	<u>Comportement à long terme des colis de déchets radioactifs</u> <ul style="list-style-type: none"> Présentation générale Validation des modèles de comportement à long terme par les analogues naturels et archéologiques 	F. Angeli S. Gin
16h00-16h15	Pause	
16h15 - 17h30	<u>Visite DHA</u> <ul style="list-style-type: none"> Combustibles irradiés (C. Jégou) Spectrométrie Raman (S. Peuget) Lixiviation des verres actifs (M. Tribet) 	C. Jégou, S. Peuget, M. Tribet
17h30 ->	Debriefing AERES huis clos	Evaluateurs

Mercredi 11 décembre

8h00 - 8h45	Analyse SWOT DTCD et perspectives à 5 ans	L. Paradis
8h45-10h00	Rencontre AERES avec des salariés du DTCD, des doctorants, des chefs de projet	
10h00 - 10h30	Entretien final	Tous
10h30 - 12h30	Debriefing AERES huis clos	Evaluateurs
12h30 - 14h00	Repas	

Pour l'ensemble des journées passées sur le site du CEA-Marcoule avec le DTCD dans une ambiance conviviale à l'image de celle qui règne dans ce département, il faut signaler l'excellente et remarquable organisation et la totale disponibilité des membres. La qualité des documents très circonstanciés envoyés avant la visite et de ceux distribués pendant la visite du comité d'experts AERES ne souffre d'aucune critique et ne peut être que tarie d'éloges. Les ingénieurs-chercheurs qui ont présenté leurs activités sont non seulement de bons scientifiques, mais ils sont de bons pédagogues et pour la plupart des professionnels de la communication.



6 • Observations générales des tutelles

Monsieur Pierre GLAUDES
Directeur de la section des unités
de recherche
AERES
20 rue Vivienne

CEA/DEN/DIR
DO 117 13/06/14



14MMAC000126

diffusé le: 13/06/14

Saclay, le 16 juin 2014

Objet : Rapport d'évaluation AERES du DTCD

Monsieur,

Nous avons bien reçu le rapport d'évaluation AERES du Département de Traitement et Conditionnement des Déchets.

Vous trouverez ci-joint ce rapport, avec quelques corrections factuelles ou suggestions mineures de modification de forme.

Je tiens à saluer la qualité de l'exercice d'évaluation qui a été menée sous votre égide, et à remercier par votre intermédiaire les membres du comité de visite. L'exercice a été également apprécié de mes équipes de recherche, et ses conclusions nous seront précieuses pour le futur.

Je vous prie d'agréer, Monsieur, l'expression de mes salutations distinguées.

Christophe BEHAR