

I. OBJET

L'article L542-1-3 du code de l'environnement stipule que « *Les propriétaires de déchets de moyenne activité à vie longue produits avant 2015 les conditionnent au plus tard en 2030.* ».

Dans ce cadre et en application de l'article 45 du PNGMDR 2016-2018, le CEA a remis en 2017 un calendrier des actions de R&D relatives à la reprise et au conditionnement des déchets MA-VL magnésiens [1]. L'avis ASN/ASND [2] émis en juillet 2021 sur ce document adresse les 3 demandes suivantes au CEA :

[CEA-Art45-1] Nous vous demandons d'intégrer à la liste de l'ensemble des déchets MA-VL à conditionner qui sera transmise au plus tard le 30 septembre 2021, pour chaque famille de déchets :

- *les études de R&D nécessaires à leur caractérisation,*
- *les études de R&D nécessaires aux différentes étapes de conditionnement en vue de leur stockage.*

[CEA-Art45-2] Nous vous demandons d'établir, sur la base de cette liste, une priorisation des études de R&D à mener et de préciser le calendrier associé à la réalisation de ces études.

[CEA-Art45-3] Pour le cas particulier des déchets magnésiens de structure et pulvérulents MA-VL, nous vous demandons de détailler le planning des études nécessaires pour étayer les procédés retenus et démontrer leur absence d'incompatibilité avec les étapes de gestion ultérieures, notamment avec les phases d'entreposage puis de stockage.

Par ailleurs, le projet de PNGMDR 2021-2025 prévoit de demander aux producteurs d'établir un état des lieux de leurs déchets à conditionner et de présenter le calendrier de conditionnement associé, en précisant les déchets présentant les plus forts enjeux en matière de sûreté et de radioprotection.

L'objet de ce document est d'apporter des éléments de réponse à l'ensemble de ces demandes.

II. STRATEGIE GLOBALE DE CONDITIONNEMENT DE CES DECHETS

Avant de présenter notre réponse à ces demandes, il paraît opportun de rappeler le contexte stratégique dans lequel s'inscrivent les opérations de reprise et de conditionnement de déchets (RCD dans la suite du texte), engageant le CEA pour de nombreuses années.

L'échéance de conditionnement au plus tard en 2030, fixée à l'article L.542-1-3 du code de l'environnement, tenait compte de la mise en service des installations de stockage dédiées (FAVL et MAVL) à des dates préalables à cette échéance (respectivement 2013 et 2025 dans la loi « Déchets » n° 2006-739 du 28 juin 2006). Cette chronologie permettait ainsi de bénéficier de spécifications de prise en charge consolidées pour ces deux exutoires finaux afin de définir les conditionnements définitifs requis associés aux déchets concernés. Or, le décalage de plusieurs années (au-delà de 2030) de la mise en service de ces installations a conduit le CEA à adopter une démarche prenant en compte ce nouveau contexte, ne permettant pas de respecter l'échéance de 2030. L'ASN et l'ASND ont ainsi acté ce constat dans le courrier de suite [3] en 2019, suite à l'instruction du dossier de stratégie de démantèlement et de gestion des déchets radioactifs de 2016.

En conséquence, dans le but d'établir une stratégie globale engageante sur le long terme et robuste aux évolutions techniques et réglementaires, le CEA a pris en compte les considérations suivantes :

- 1) L'expédition vers CIGEO des colis de déchets entreposés sur sites CEA n'interviendra pas avant 2050 selon la chronique de livraison basée sur le PIGD VE [4] et tenant compte du décalage des déchets bitumés au-delà de la Phase Industrielle Pilote ;
- 2) Les spécifications préliminaires d'acceptation en stockage géologique profond ont été émises dans le cadre du Dossier d'Orientation de Sûreté (DOS) de Cigéo, celles en cours d'élaboration pour le dossier de Demande d'Autorisation de Construction (DAC) ne sont disponibles aux producteurs qu'en version projet et donc ne sont pas approuvées par l'ASN. En conséquence, en parallèle depuis plusieurs années, le CEA a dû adapter sa stratégie de reprise et conditionnement des déchets anciens sans disposer des éléments permettant d'affiner les filières de gestion de déchets jusqu'à l'exutoire. L'objectif recherché a donc été de réduire la nocivité des déchets, d'assurer leur mise en état sûr, et de garantir la compatibilité de leur conditionnement avec les étapes ultérieures de gestion au regard des informations disponibles à cet effet.

Annexe au courrier DSSN 2021-619
Etat des lieux du conditionnement des déchets MAVL produits avant 2015

- 3) Une partie des déchets anciens pourrait être éligible à un stockage FA-VL. Or, la visibilité, aussi bien sur l'échéance de mise à disposition d'un stockage FA-VL que sur les exigences des futures spécifications d'acceptation, est insuffisante. Dans ce cadre, le CEA n'est pas en capacité d'étudier avec fiabilité l'optimisation de la répartition entre les filières.

En conséquence, lorsqu'il n'est pas possible de définir le conditionnement définitif d'un déchet, le CEA met en œuvre une stratégie consistant à différer ce conditionnement définitif de ces déchets anciens afin d'éviter de nouvelles opérations de reprise complexes en cas de non-respect des futures spécifications définitives de l'installation de stockage CIGEO, voire FAVL après étude d'optimisation.

En ce sens, le CEA a proposé en 2016 une priorisation des opérations de RCD visant à réduire le terme source mobilisable des installations et mettre en état sûr les déchets concernés le plus rapidement possible. Cela consiste pour certains projets à mettre en service des installations d'entreposage d'attente dont le référentiel évite de différer la RCD et permet de mettre en état plus sûr les déchets dans des conteneurs adaptés et respectant les spécifications d'entrée de ces entreposages d'attente du CEA. Ces déchets pourront ultérieurement faire l'objet d'une reprise et d'un conditionnement final afin de respecter les exigences des futures spécifications des installations de stockage idoines.

Les actions de conteneurisation de déchets MAVL produits avant 2015 s'inscrivent dans cette stratégie. La planification associée, partant des actions de R&D jusqu'au conditionnement définitif, découle de cette perspective.

III. PERIMETRE DES DECHETS MAVL CONCERNES

Afin de répondre précisément à la demande, l'établissement d'un état des lieux des déchets produits avant 2015 et non conditionnés requiert une définition claire du périmètre concerné. Pour ce faire, le CEA s'est basé sur le contenu des déclarations à l'inventaire national et a pris appui sur les définitions apportées par l'arrêté du 9 octobre 2008 relatif à la nature des informations que les responsables d'activités nucléaires et les entreprises mentionnées à l'article L.1333-10 du code de la santé publique ont l'obligation d'établir, de tenir à jour et de transmettre périodiquement à l'Andra. A ce titre, le CEA définit les déchets concernés par la demande, comme étant les déchets relevant de la filière MAVL, dans les catégories « non conditionnés » et « pré-conditionnés », déclarés à l'inventaire national dans sa version disponible à fin 2020. L'inventaire en résultant est donné dans le tableau 1 ci-après.

Famille IN	Libellé IN	Déchets concernés*	Volume équivalent conditionné (m ³)
DIV2-05	Déchets divers MAVL	Déchets divers de Saclay, Cadarache, Marcoule, Fontenay-aux-Roses	120
F2-4-07	Colis de déchets de structure métalliques (Marcoule)	Déchets entreposés en fosses zone nord, issus de combustibles Phénix, combustibles OSIRIS... traités à l'usine UP1 (Al, acier inox, graphite)	270
F2-4-08	Colis de déchets cimentés en fûts métalliques	Déchets technologiques métalliques et organiques riches en alphas du CEA Marcoule	61
F2-4-09	Colis de déchets de structure magnésiens (Marcoule)	Déchets entreposés en fosses du dégainage et MAR400	1 645
F2-4-10	Colis de déchets de procédé et colis d'effluents cimentés (Marcoule)	Déchets de procédé MAR400, dépôts de fonds de cuve UP1 et SPF/AVM	905
F2-4-11	Déchets technologiques métalliques (Marcoule)	Déchets en puits et fosses zone nord (déchets métalliques et organiques)	280
F2-4-14	Colis de déchets de structure et déchets de démantèlement (Marcoule)	Déchets de structure entreposés à l'APM (acier inox et zircaloy)	41

Annexe au courrier DSSN 2021-619
Etat des lieux du conditionnement des déchets MAVL produits avant 2015

Famille IN	Libellé IN	Déchets concernés*	Volume équivalent conditionné (m ³)
F2-4-15	Aiguilles des barres de commande des réacteurs à neutrons rapides	Déchets contenant du B4C issus de la phase d'exploitation des réacteurs RNR Rapsodie et Phénix	5
F2-5-05	Colis de déchets solides d'exploitation moyennement irradiants, en fûts de 500 litres (Cadarache)	Projet vrac MI : déchets non conditionnés en fosses INB56 Divers autres déchets d'origines variées	262
F2-5-07	Colis de déchets solides cimentés en fûts métalliques (CEA Cadarache)	Tranchées INB56 et divers autres déchets d'origines variées	370**
F2-6-03	Conteneurs en acier inoxydable contenant des effluents radioactifs vitrifiés (CEA Valduc)	Effluents en partie produits, entreposés au CEA Valduc	5
VOLUME TOTAL (m3)			3 964

*les déchets concernés peuvent ne correspondre qu'à une partie de la famille IN

**dont 315 m³ estimés pour les tranchées, hypothèse qui devrait être revue avec le Retour d'Expérience (REX) de la tranchée T2 qui laisse présager d'une orientation majoritaire vers les filières opérationnelles de l'Andra (cf §VI.6)

Tableau n°1 : Familles de déchets MAVL produits avant 2015, non conditionnés ou pré-conditionnés, déclarées à l'inventaire national à fin 2020

Pour chaque famille IN, les volumes indiqués correspondent uniquement à la fraction de déchets non conditionnés ou pré-conditionnés. La cohérence des familles identifiées, avec celles de l'inventaire de référence du projet de stockage profond CIGEO, a été vérifiée.

Il ressort de ce tableau que **le volume de déchets produits avant 2015 et non conditionnés à fin 2020 est de 3 964 m³ (en équivalent conditionné) soit 18% du volume total de déchets MAVL présent sur sites CEA (21 852 m³ en stock à fin 2020).**

On notera que les déchets bitumés, pour lesquels les opérations en cours ne consistent qu'à les surfûter pour entreposage dans les EIP lors du transfert depuis les casemates, ne sont pas listés ici car déjà conditionnés. A ce sujet, le CEA rappelle qu'un programme conséquent de R&D quadripartite a été lancé depuis le 1^{er} octobre 2020 pour apporter les éléments complémentaires visant à démontrer leur acceptabilité en stockage.

IV. MISE EN PERSPECTIVE DE LA STRATEGIE DE CONDITIONNEMENT DU CEA POUR LES DECHETS INVENTORIES

Les déchets MAVL produits avant 2015 et non conditionnés ou pré-conditionnés inventoriés font partie de l'une des filières suivantes :

- Déchets moyennement irradiants: conditionnement en colis cimentés et entreposage dans CEDRA puis expédition à CIGEO en l'état à partir de 2050,
- Déchets irradiants: entreposage d'attente DIADEM (éventuellement, après traitement), puis expédition à CIGEO, le cas échéant après immobilisation dans une matrice, à partir de 2050,
- Déchets issus des opérations, en cours ou à venir, de reprise/conditionnement du site de Marcoule : entreposage d'attente EDEN après traitement dans des installations spécifiques sur le site de Marcoule, puis expédition à CIGEO, le cas échéant après immobilisation dans une matrice, au-delà de 2075.

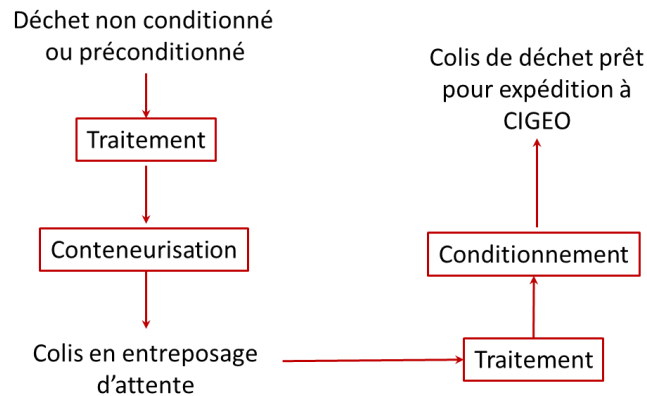
Le tableau 2 ci-après indique pour chaque famille recensée la date envisagée pour le conditionnement, la filière envisagée (entreposage de destination), et la date d'expédition à CIGEO selon la dernière référence officielle du PIGD VE. La date de conditionnement indiquée correspond soit au

Annexe au courrier DSSN 2021-619
Etat des lieux du conditionnement des déchets MAVL produits avant 2015

conditionnement considéré comme définitif (pour les colis destinés à CEDRA), soit à la conteneurisation pour entreposage d'attente (pour les colis destinés à DIADEM et EDEN).

Le CEA considère qu'à la date de conditionnement/conteneurisation indiquée, les déchets associés auront été mis dans un état de sûreté satisfaisant, compatible avec les étapes ultérieures de gestion en vue de leur stockage définitif. En parallèle, sur la base des spécifications d'acceptation des exutoires concernés (MAVL, voire FAVL), lorsqu'elles seront approuvées, le CEA consolidera les dispositions opérationnelles nécessaires pour mettre en œuvre les conditionnements définitifs avant expédition à l'exutoire. Cela s'inscrit dans la continuité des programmes de R&D qui sont prévus pour les différentes étapes de conditionnement, y compris pour le stockage.

En fonction de la filière retenue, les déchets subiront donc tout ou partie des opérations de traitement et/ou conditionnement mises en évidence dans le schéma suivant :



La définition de chaque opération (y compris la caractérisation préalable des déchets) est susceptible de nécessiter des actions de R&D.

Annexe au courrier DSSN 2021-619
Etat des lieux du conditionnement des déchets MAVL produits avant 2015

Famille IN	Libellé IN	Déchets concernés*	Date de conditionnement / conteneurisation prévue	Entreposage de destination**	Date d'expédition à Cigéo selon PIGD VE
DIV2-05	Déchets divers MAVL	Déchets divers de Saclay, Cadarache, Marcoule, Fontenay-aux-Roses	divers	DIADEM	> 2050
F2-4-07	Colis de déchets de structure métalliques (Marcoule)	Déchets entreposés en fosses zone nord, issus de combustibles Phénix, combustibles OSIRIS... traités à l'usine UP1 (Al, acier inox, graphite)	2055-2070	EDEN	> 2075
F2-4-08	Colis de déchets cimentés en fûts métalliques	Déchets technologiques métalliques et organiques riches en alphas du CEA Marcoule	2022	CEDRA	>2050
F2-4-09	Colis de déchets de structure magnésiens (Marcoule)	Déchets entreposés en fosses du dégainage et MAR400, coques INB56 Cadarache	2035-2055	EDEN	>2075
F2-4-10	Colis de déchets de procédé et colis d'effluents cimentés (Marcoule)	Déchets de procédé MAR400 dépôts de fonds de cuve UP1 et SPF/AVM	2040-2060	EDEN	>2075
F2-4-11	Déchets technologiques métalliques (Marcoule)	Déchets en puits et fosses zone nord (déchets métalliques et organiques)	2035-2060	EDEN	>2075
F2-4-14	Colis de déchets de structure et déchets de démantèlement (Marcoule)	Déchets de structure entreposés à l'APM (acier inox et zircaloy)	2040-50	DIADEM*	>2050
F2-4-15	Aiguilles des barres de commande des réacteurs à neutrons rapides	Déchets contenant du B4C issus de la phase d'exploitation des réacteurs RNR Rapsodie et Phénix	En cours d'étude	DIADEM	>2055
F2-5-05	Colis de déchets solides d'exploitation moyennement irradiants, en fûts de 500 litres (Cadarache)	Projet vrac MI : déchets non conditionnés en fosses INB56 Divers autres déchets d'origines variées	2032-39 (vrac MI) divers	CEDRA	>2065
F2-5-07	Colis de déchets solides cimentés en fûts métalliques (CEA Cadarache)	Tranchées INB56 Divers autres déchets d'origines variées	2040-60 divers	CEDRA	>2050
F2-6-03	Conteneurs en acier inoxydable contenant des effluents radioactifs vitrifiés (CEA Valduc)	Effluents en partie produits, entreposés au CEA Valduc	<2050	Valduc	>2080

*les déchets concernés peuvent ne correspondre qu'à une partie de la famille IN

** dans le cas d'EDEN et DIADEM il s'agit d'entrepôts d'attente

Tableau 2 : Mise en perspective de la stratégie de conditionnement par familles de déchets MAVL produits avant 2015 non conditionnés ou pré-conditionnés

V. DEFINITION D'UN CONDITIONNEMENT POUR ENTREPOSAGE OU STOCKAGE : DEMARCHE DE R&D

Conformément aux opérations décrites au §4, les actions de R&D peuvent porter sur les différentes étapes conduisant à la définition du conditionnement final : caractérisation du déchet à conditionner, prétraitement éventuellement nécessaire, mise en conteneur pour entreposage d'attente éventuel, définition du colis final destiné au stockage profond et du procédé associé.

V.1. EN AMONT DE LA MISE EN CONTENEUR OU DU CONDITIONNEMENT FINAL

La définition des différentes étapes de conditionnement, en vue de leur stockage, dépend, au premier ordre, des caractéristiques physiques, chimiques et radiologiques des déchets MAVL à considérer. L'étape préalable à toute définition d'un mode de conditionnement consiste donc à caractériser les déchets à conditionner. Cela passe par la réalisation de prélèvements, opérations qui peuvent être complexes en fonction du milieu considéré, et par des analyses radiochimiques et/ou physico-chimiques, voire des caractérisations spécifiques au besoin. Ces analyses ne constituent pas des actions de R&D à proprement parler, hormis certains cas très spécifiques demandant des développements de méthodes particulières.

A titre d'exemple sur ces cas spécifiques, les protocoles de caractérisation des dépôts de fonds de cuve UP1 ont fait l'objet de développements analytiques afin d'être en mesure d'identifier la nature des phases cristallines constituant ces déchets et de les quantifier de manière relative.

En amont de leur conditionnement, en conteneur pour leur entreposage ou en matrice de conditionnement pour leur stockage, certaines typologies de déchets (effluent liquide/boue/déchets humides...) pourront faire l'objet d'opérations spécifiques en vue de les rendre compatibles avec les étapes suivantes. Il peut s'agir d'étapes de séchage, de séparation solide/liquide ou décontamination, pour lesquelles les actions de R&D viseront à identifier le domaine de fonctionnement des dispositifs éventuellement nécessaires.

V.2. ETUDES DE R&D NECESSAIRES POUR L'ENTREPOSAGE DES DECHETS MAVL

Dans le cas des déchets MAVL destinés à un entreposage d'attente, compte tenu de la stratégie du CEA décrite au chapitre §II, la première étape de conditionnement consiste en une mise en conteneur métallique (conteneurisation), sans action de blocage en matrice de conditionnement, en vue de leur entreposage d'attente dans EDEN ou DIADEM.

La conception du conteneur doit répondre aux exigences de tenue à la corrosion, maintien du confinement, évacuation des gaz de radiolyse (maîtrise du risque hydrogène), tenue à la chute. Les conditions de maîtrise de ces risques seront notamment prises en compte dans le choix du matériau de conteneur, ses caractéristiques, le dimensionnement du système de ventilation de l'entreposage et son domaine de fonctionnement.

Le processus de conception et de qualification du conteneur et les spécifications associées à l'entreposage s'appuient donc sur des actions de R&D portant notamment sur :

- la maîtrise du risque de corrosion du conteneur en acier, en fonction de la nature du déchet et de l'environnement d'entreposage,
- l'évaluation du terme source H₂ induit par la présence de composés organiques dans les déchets et de molécules d'eau constitutives des composés solides.

La qualification des conteneurs CDD (DIADEM) et CID (Conteneur Inox Déchets, EDEN) est prévue respectivement en 2023 et à l'horizon 2025.

Par ailleurs, il est nécessaire de s'assurer que les conditions d'entreposage ne conduiront pas à une évolution des déchets contenus, de nature à remettre en cause la capacité ultérieure à produire un colis définitif. Sur cet aspect, il convient de préciser que les déchets initialement non conditionnés ou pré-conditionnés ne subiront pas de mélange avant entreposage d'attente, et que les conditions d'environnement seront maîtrisées. Les actions listées précédemment pour démontrer l'intégrité du conteneur et la sûreté de l'entreposage, s'appuieront sur l'acquisition de connaissances relatives au vieillissement du déchet (dégagement de gaz, produits de dégradation sous radiolyse ou corrosion...).

Annexe au courrier DSSN 2021-619
Etat des lieux du conditionnement des déchets MAVL produits avant 2015

De ce fait, hors traitement préalable spécifique (cas traités aux § VI.2 et VI.3), le CEA considère qu'il disposera des éléments de connaissances nécessaires pour démontrer que l'étape de conditionnement définitif ne sera pas affectée.

V.3. ETUDES DE R&D NECESSAIRES POUR LE STOCKAGE DES DECHETS MAVL

A l'issue de la période d'entreposage définie pour chaque famille de déchet, les déchets MAVL pourront être repris et conditionnés par une matrice définie, au moment opportun et au plus juste besoin, avant leur expédition vers CIGEO.

Le choix du conditionnement (vitrification, cimentation, bitumage) dépend des performances du colis attendues et résulte d'un compromis technico-économique et de sûreté au regard des principaux critères ci-dessous :

- Un taux de charge optimum en déchets dans le colis,
- Si possible un procédé de conditionnement robuste et éprouvé bénéficiant d'un REX industriel conséquent,
- A défaut la mise au point d'un procédé « nucléarisable », dans les conditions des meilleures techniques disponibles (MTD) du moment,
- La recherche des propriétés de comportement dans le temps de sorte à maîtriser les risques sur la période d'exploitation du stockage (notamment risque explosivité comme dans les entreposages), puis après fermeture (resaturation des alvéoles, transfert des radionucléides, impact sur les matériaux environnants) :
 - o Confinement des RN,
 - o Tenue mécanique et stabilité dans le temps,
 - o Tenue à l'auto-irradiation,
 - o Durabilité chimique et de son impact sur le terme source radiologique,
 - o Capacité de relâchement de gaz, notamment H₂ de radiolyse et évaluation du terme source Gaz.

Le **procédé de bitumage** a été largement utilisé en France pour conditionner en ligne les déchets résultant du traitement des effluents liquides par précipitation chimique. Il est probable qu'à l'avenir ce procédé sera de moins en moins utilisé, car, du fait des risques inhérents à la mise en œuvre du procédé, les matrices telles que le verre et le ciment sont aujourd'hui privilégiées. Les études de comportement de la matrice bitume soumise à diverses sollicitations sont menées par le CEA et les autres producteurs ainsi que l'ANDRA dans le cadre du programme BABYLONE. Ces actions de R&D étant dédiés à des déchets déjà conditionnés, elles ne sont pas considérées dans le présent document (cf. chapitre III).

Pour les déchets MAVL, le CEA privilégie quand cela est possible, les **procédés de cimentation**. En effet, pour les déchets fortement irradiants et/ou contaminés en émetteurs alpha, le conditionnement par solidification en matrice cimentaire est une solution robuste, qui est déjà largement utilisée pour le conditionnement des déchets relevant de cette catégorie radiologique. Il est bien adapté au conditionnement de déchets solides, mais aussi à l'immobilisation de déchets sous forme pulvérulente. Les déchets solides peuvent également être compactés avant blocage par un liant hydraulique. Ainsi, les colis 870L Faiblement Irradiants (FI) et 500L Moyennement Irradiant (MI) bénéficient d'un REX de plusieurs décennies sur le site de Cadarache et un accord de conditionnement a été obtenu en septembre 2021.

Les principaux impacts des rayonnements sur les matériaux cimentaires, en particulier pour de fortes activités alpha, sont la production de gaz (hydrogène essentiellement) par radiolyse de l'eau présente dans la porosité et les hydrates cimentaires ainsi que par radiolyse des déchets organiques éventuellement présents. Dans le cas de déchets réactifs tels que l'aluminium ou le magnésium, l'hydrogène peut également être généré par la mise en contact du déchet avec la matrice cimentaire (corrosion en présence d'eau en milieu basique). Les principales actions de R&D à mener concernent donc le développement d'une formulation cimentaire adaptée au déchet considéré, et l'étude de son comportement, notamment vis-à-vis de la maîtrise du dégagement d'hydrogène :

Annexe au courrier DSSN 2021-619
Etat des lieux du conditionnement des déchets MAVL produits avant 2015

- Développement de matériaux cimentaires minimisant les productions de gaz de radiolyse, tout en respectant des critères de mise en œuvre. Ainsi dans le cadre du PIA MATRICE¹, les voies d'études afin de minimiser la production de dihydrogène issu de la radiolyse ont consisté notamment en la minimisation de la teneur en eau dans les ciments usuels ou encore dans l'utilisation de ciments « alternatifs » ;
- Développement de matrices de conditionnement spécifiques qui permettraient de prendre en charge les déchets considérés comme réactifs en milieu cimentaire usuel tout en réduisant la production d'hydrogène en stockage. Le principe de ces matrices est de placer les métaux réactifs dans leur domaine de passivité en favorisant la formation d'une couche protectrice, conduisant à l'obtention de vitesses de corrosion et de production de gaz nettement plus faibles que dans des matrices cimentaires classiques. Ainsi parmi les travaux en cours au CEA, l'utilisation de géopolymères (liants minéraux aluminosilicatés quasi-amorphes et pauvres en calcium) est aujourd'hui étudiée pour le conditionnement du magnésium ;
- Évaluation de la production d'hydrogène des colis constitués (action de R&D transverse). L'approche développée par le CEA consiste en une méthodologie calculs/mesures pour consolider les valeurs de relâchement de H₂ dans les colis et contenants primaire, de sorte à apporter à l'ANDRA le moment venu, la garantie du respect de la spécification d'acceptation à Cigéo.

L'ensemble de ces actions de R&D permettront au CEA, le moment venu, de disposer d'un ensemble de formulations cimentaires qui pourront être adaptées au conditionnement de déchets de caractéristiques variées.

Pour des déchets de composition complexe (type boues, Résine Echangeuse d'Ions) et fortement irradiants, et au cas où les procédés de cimentation s'avèreraient non adaptés, le CEA évalue des procédés alternatifs basés sur **un traitement thermique et un conditionnement en matrice vitreuse**. De tels procédés permettent de s'affranchir des problématiques de radiolyse. Dans ce cas, les principales actions de R&D portent sur la définition d'une formulation de matrice vitreuse compatible avec les caractéristiques physico-chimiques des déchets à conditionner (homogénéité du verre, robustesse, rhéologie, réactivité, foisonnement, corrosion, durabilité...), et sur le développement et la nucléarisation du procédé de vitrification, intégrant la réalisation d'essais à échelle pilote.

L'évaluation des procédés de traitement thermique, développés en France (SHIVA, DEM&MELT) et à l'international (GEOMELT), considérés comme d'intérêt pour le traitement des déchets radioactifs, notamment issus d'opérations d'A&D a été réalisée dans le cadre du projet H2020 THERAMIN. Ce projet, achevé en 2018, a permis notamment d'établir l'analyse multicritères pour l'évaluation (exigences opérationnelles, impacts environnementaux, durée de développement, ...) en termes de performances de traitement, de ces procédés. Ainsi, les études menées dans le cadre du projet DEM&MELT² ont permis de développer un procédé de traitement/vitrification utilisant la technologie « in can melter » pour le conditionnement des déchets de type MAVL (solide ou liquide) générés par les opérations d'A&D (boues, zéolithes, ...).

L'ensemble de ces développements permettront au CEA, le moment venu, de disposer d'un panel de procédés d'intérêt en fonction des besoins qui pourraient être identifiés pour les différentes typologies de déchets.

VI. DECLINAISON AUX DECHETS DU CEA PRODUITS AVANT 2015, NON CONDITIONNES OU PRECONDITIONNES : STRATEGIE ET PRIORISATION

Les actions de R&D prioritaires sont de deux natures :

- Les actions « court terme » qui sont nécessaires à la mise en état sûr des déchets issus des chantiers identifiés comme prioritaires selon un critère de terme source mobilisable selon la stratégie résumée au chapitre II,

¹ Projet MATRICE coordonné par le CEA en partenariat avec Léon Grosse, l'institut des Nanosciences et innovation pour les matériaux, Vicat et l'Andra (2016-2021) financé pour partie pour le "Programme d'Investissements d'Avenir" déchet.

² Projet Dem&Melt coordonné par le CEA en partenariat avec ORANO, ECM Technologies et Andra (2016-2021) financé pour partie pour le "Programme d'Investissements d'Avenir" déchet.

Annexe au courrier DSSN 2021-619
Etat des lieux du conditionnement des déchets MAVL produits avant 2015

- Les actions relevant de l'anticipation des besoins futurs donc du moyen-long terme, visant à développer des solutions de traitement et/ou conditionnement et à disposer d'une « boîte à outils » utilisable pour définir, le moment venu, le meilleur conditionnement définitif pour les déchets destinés à CIGEO. Certaines de ces actions sont soutenues par des financements publics via les Programmes d'Investissement d'Avenir (PIA) ou européens via les projet H2020 (Euratom). Il s'agit des actions recensées au chapitre V.3.

Les paragraphes suivants reprennent, pour chaque type de déchet identifié, la stratégie actuellement retenue par le CEA, le calendrier de conditionnement prévu, et les actions de R&D nécessaires (en cours ou à venir) avec éléments de calendrier associés. Il s'agit de la meilleure vision à date. Il sera également précisé si la reprise des déchets concernés est identifiée comme une priorité 1 du CEA.

VI.1 DECHETS RICHES EN EMETTEURS ALPHA DU CEA MARCOULE (F2-4-08)

Il s'agit de fûts de 100 à 118 L contenant des déchets technologiques contaminés en émetteurs alpha (U, Pu) et conditionnés sous manches vinyle, entreposés sur le site du CEA Marcoule. Ces déchets ont été générés par les activités de recyclage de combustibles usés de type UNGG.

Ces fûts riches sont actuellement triés et conditionnés sur le site de Marcoule, produisant ainsi des colis de 870 litres en cours d'évacuation vers l'installation d'entreposage CEDRA implantée sur le site CEA de Cadarache. Il est prévu d'achever ces opérations d'ici fin 2022. Il s'agit d'un chantier de priorité P1.

Aucune action de R&D n'est nécessaire sur ces déchets.

VI.2 DECHETS MAGNESIENS (F2-4-09)

Les déchets de structure magnésiens sont constitués des gaines et des bouchons (ou queusots) des combustibles des réacteurs UNGG traités sur le site de Marcoule. Ces déchets se présentent sous forme broyée, compactée ou vrac. La majorité de ces déchets magnésiens est répartie dans 16 fosses sur deux installations de Marcoule. Ils font l'objet de programmes de caractérisation qui se poursuivent jusqu'en 2024. Les déchets se répartissent en FMA-VC et MAVL, et une partie des déchets aujourd'hui identifiés MAVL pourrait être catégorisée en FAVL selon les critères qui seront définis par l'Andra. La reprise de ces déchets est un chantier de priorité P1.

Dans le cadre de la mise en état sûr des déchets et la diminution du terme sources, le CEA en accord avec le DSND a priorisé l'évacuation des déchets FMA-VC des fosses du dégainage, dont l'exutoire final est connu ; les actions relatives au conditionnement de ces déchets en vue de leur prise en charge au CSA sont donc devenues prioritaires [3].

Les déchets MAVL seront repris et conditionnés, sans blocage, en conteneurs CID dans un futur atelier dédié sur Marcoule, en incluant la possibilité d'une réduction de volume par briquetage, avant envoi sur l'entreposage EDEN. Compte tenu de la priorisation indiquée précédemment, ces opérations de conditionnement sont prévues à partir de 2035 pour les déchets MAVL et jusque 2055.

Par ailleurs, 11 coques de déchets magnésiens sont actuellement entreposées dans le hangar H4 de l'INB56 à Cadarache. Il est prévu de les transporter vers le site de Marcoule afin de reconditionner en surfût EIP les poubelles qu'elles contiennent, et de les entreposer. Ces opérations, également identifiées en priorité P1 dans la stratégie A&D du CEA, sont prévues d'ici 2026. Ces déchets magnésiens seront *in fine* traités via les mêmes unités que pour les déchets magnésiens de Marcoule, pour être entreposés sur l'installation EDEN en conteneurs CID dans l'attente de leur conditionnement définitif puis de leur expédition vers Cigéo.

A noter qu'une matrice d'immobilisation spécifique (géopolymère) a été développée pour le conditionnement des déchets magnésiens de la fosse 0 (sans briquetage), destinés au CSA (FMA VC). La reprise de la fosse 0 constitue une opération pilote. Les travaux de R&D ainsi réalisés et le REX des opérations industrielles seront valorisés le moment venu pour définir, par transposition, le conditionnement définitif des déchets magnésiens MAVL. L'expédition à Cigéo de ces colis étant prévue à l'horizon 2075, le CEA prévoit de capitaliser les acquis et de poursuivre les développements transverses et génériques tels que décrits au §V.4, les développements spécifiques à visée opérationnelle pouvant n'être enclenchés qu'au-delà de 2050.

Comme évoqué au §V.3, le choix de briqueter les gaines pose la question de l'innocuité du procédé de conditionnement vis-à-vis du déchet et nécessite de démontrer que le conditionnement final n'est pas

Annexe au courrier DSSN 2021-619
Etat des lieux du conditionnement des déchets MAVL produits avant 2015

mis en cause. Le CEA a prévu de réaliser des mesures de dégazage de déchets magnésiens broyés ou briquetés bloqués dans du géopolymère pour confirmer (ou non) le bénéfice pressenti consécutif du briquetage. La conception de l'atelier de conditionnement étudié permet de choisir de briqueter ou non les déchets sans devoir être revue en profondeur. Par ailleurs, la faisabilité technique de transformer des briquettes en broyats est acquise et techniquement simple.

VI.3 DECHETS DE PROCEDE (F2-4-10)

Les déchets de procédé sont majoritairement liés à l'exploitation de l'usine UP1 et aux opérations de mise à l'arrêt définitif et de démantèlement de l'usine : systèmes de filtration des eaux de piscines (résines échangeuses d'ions, zéolithes...), graphite pulvérulent provenant des combustibles des réacteurs de la filière Uranium Naturel-Graphite-Gaz (UNGG) et dépôts de fond de cuves issus du démantèlement d'UP1 et de SPF/AVM. La plupart sont entreposés dans des fosses sur l'installation MAR400.

Les déchets en fosses ont fait l'objet de campagnes de prélèvement qui se sont achevées en 2016. De même que pour les déchets magnésiens, ces programmes ont permis de consolider de façon enveloppe la proportion de déchets relevant de la filière MAVL, néanmoins le CEA va poursuivre ces investigations pour valider les opportunités de re-catégorisation pressenties.

Le scénario retenu pour les déchets MAVL des fosses MA-Est, ZN1 et Décanteur, consiste en un séchage dans un futur atelier de traitement et un conditionnement en conteneur d'entreposage EDEN, non bloqués. Ces opérations de conditionnement sont prévues à partir de 2040 pour les déchets MAVL et jusque 2060. Il s'agit d'un chantier en priorité P1.

Pour l'exutoire final, la mise en œuvre d'un procédé de cimentation est envisagée. Le CEA a mené des actions de R&D pour consolider le nombre de colis finaux en résultant. Une formulation cimentaire a ainsi été développée pour les déchets de la fosse MA-Est, et couvrant les typologies de déchets des fosses ZN1 et Décanteur. Ces travaux devront être repris et poursuivis de sorte à disposer d'un procédé opérationnel au moment de l'expédition à Cigéo, actuellement prévue au-delà de 2075. Comme pour les déchets magnésiens, ces travaux pourront se baser sur le REX des opérations industrielles menées, ainsi que sur les développements qui auront été menés pour l'évacuation des déchets éligibles au FMA-VC.

Comme pour les déchets magnésiens, se pose la question de l'innocuité des traitements envisagés, vis-à-vis du déchet et de son conditionnement final. Pour ces déchets pulvérulents, en réponse aux demandes de l'ASND, le CEA a apporté des éléments visant à démontrer la sûreté des opérations de séchage au regard de la réactivité/pyrophoricité des déchets. Ces analyses se poursuivent.

La reprise des dépôts de fonds de cuve de l'AVM est envisagée sur la période 2040-2080, avec reconditionnement en conteneurs CID destinés à l'entreposage EDEN. La justification du respect des spécifications EDEN et la définition du colis final requièrent des caractérisations chimiques et radiologiques des dépôts, à mener dans les prochaines années et en amont des dates de reprise associées aux différents équipements. Les activités de caractérisation et études de reprise sont classées en priorité 1.

Concernant l'usine UP1, la fin de reprise des dépôts des cuves de MAR200 est prévue d'ici 2050-2055 ; celle des cuves de 100 HA à l'horizon 2050, et pour les évaporateurs d'ici 2065. Ces dépôts seront entreposés respectivement sur EDEN (conteneur CID), et sur DIADEM (conteneur CDD). L'état de connaissance physico-chimique et radiologique, ainsi que la stratégie de conditionnement final de ces déchets à l'issue de la période d'entreposage, seront affinés et consolidés lors de la reprise.

Pour l'ensemble de ces dépôts de fonds d'équipements, il est probable que des actions de R&D complémentaires soient à mener à terme (pas de besoin avant plusieurs décennies), si possible pour définir une formulation cimentaire.

Annexe au courrier DSSN 2021-619
Etat des lieux du conditionnement des déchets MAVL produits avant 2015

VI.4 DECHETS DE STRUCTURE ET TECHNOLOGIQUES METALLIQUES (F2-4-07, F2-4-11, F2-4-14)

Les trois familles F2-4-07, F2-4-11 et F2-4-14 ont été regroupées ici car elles concernent toutes des déchets métalliques avec éventuellement présence d'organiques.

Les déchets de structure métalliques (F2-4-07) des combustibles autres que ceux des réacteurs UNGG (combustibles Phénix, combustibles OSIRIS...) traités à l'usine UP1 se trouvent actuellement dans les fosses du dégainage et en zone nord. Le scénario actuellement retenu consiste à les traiter et conditionner dans une future unité de traitement avant une mise en entreposage d'attente sur l'installation EDEN. La fin des opérations de RCD est prévue à l'horizon 2070.

Les déchets technologiques anciens (F2-4-11) actuellement en puits et en fosses de la zone nord de du site de Marcoule, sont destinés à une mise en conteneur pour entreposage d'attente dans l'installation EDEN. Les scénarios actuellement retenus prévoient un traitement dans ATRIM pour les déchets relevant *a priori* de la filière MAVL. Ces opérations pourraient conduire à optimiser le choix de l'exutoire final. A noter que la reprise des fosses HA relève d'une priorité 1 du CEA, de ce fait les déchets générés seront entreposés dans l'entreposage intermédiaire EI ZN, en attendant d'être traités sur ATRIM. Les opérations de reprise se dérouleront sur 10 ans, entre 2035 et 2045. Elles seront suivies des opérations de reprise des autres fosses et puits, jusqu'en 2060 environ.

L'évacuation des déchets de structure (F2-4-14) produits entre 1974 et 1997 sur les chaînes TOP (Traitement Oxyde Pilote) et TOR (Traitement Oxyde réacteur RNR) est prévue vers l'entreposage BETTI en 2034-37 avant leur conditionnement en conteneur CDD sur l'installation ATRIM à partir de 2040 pour un entreposage d'attente sur l'installation DIADEM.

La définition d'un conditionnement final pour ces typologies de déchets pourra largement bénéficier du REX issu de plusieurs décennies de conditionnement de déchets technologiques sur le site de Cadarache (870L FI, 500L MI). La présence de métaux réactifs tels que l'aluminium pourra être prise en compte via les actions de R&D en cours sur les formulations cimentaires indiquées au §V.3.

VI.5 VRAC MI INB56 (F2-5-05)

Les déchets non conditionnés entreposés dans les fosses anciennes (F1 à F4) de l'INB56 seront repris dans le cadre du projet « Vrac MI ». Les déchets relevant de catégories MAVL seront conditionnés en 500L MI vrac pour les déchets moyennement irradiants, et en 870L FI vrac pour les déchets faiblement irradiants. Il s'agit de colis définitifs constitués directement sur l'INB56 et destinés à un entreposage sur CEDRA avant expédition à CIGEO.

Une demande d'accord de conditionnement sera déposée en vue d'autoriser la fabrication de ces colis définitifs de 500L vrac MI, à l'horizon 2026 pour une production de colis pendant une période d'au moins 7 ans, à l'horizon 2033-2039. La production des 870L FI sera réalisée selon le même procédé que celui actuellement mis en œuvre à l'INB37A. **Aucun besoin de R&D spécifique n'est identifié.**

Il s'agit d'un chantier de priorité P1.

VI.6 DECHETS DES TRANCHEES DE L'INB56 (F2-5-07)

La caractérisation de ces déchets sera réalisée lors de la reprise et permettra d'orienter au juste besoin les colis vers l'exutoire ad hoc CSA/FAVL/MAVL et donc de confirmer le volume relevant éventuellement de la filière MAVL. Cependant, à ce stade, le retour d'expérience de la tranchée T2 permet de montrer que la totalité des déchets extraits sont de natures TFA ou FA, à l'exception de coques béton intègres qui devront être caractérisées. A l'exception de ces coques bétons, il ne devrait donc pas être produits de nouveaux colis catégorisés MAVL, après reprise et conditionnement des terres et des déchets vracs contenus dans les tranchées T1, T3, T4 et T5.

La stratégie actuelle de reprise devrait être définie fin 2023 et la période de reprise et de conditionnement, prévue aux termes des développements des procédés actuellement envisagés, devrait démarrer à l'horizon 2040 pour une fin d'opération avant 2060.

Des actions de R&D sont en cours pour développer une formulation cimentaire adaptée à des déchets de type terres, boues et déchets pulvérulents, ainsi que le procédé associé, pour un conditionnement en colis définitif. Ces actions de R&D et la stratégie de reprise et conditionnement seront détaillées dans une réponse du CEA à l'ASN prévue fin 2023.

VI.7 DECHETS CONTENANT DU B4C ET DU SODIUM (F2-4-15)

Les déchets contenant du carbure de bore (B4C) proviennent des assemblages de commande des réacteurs à neutrons rapides Phénix et Rapsodie. Certains sont identifiés comme évacuables vers l'installation d'entreposage d'attente DIADEM. D'autres sont susceptibles de contenir du sodium résiduel qui n'aurait pas été éliminé lors des opérations de lavage des barres de commande. La présence de traces résiduelles de sodium soulève une problématique de réactivité. Des études sont à mener pour confirmer ou non leur appartenance à la catégorie MAVL et définir leur stratégie de gestion en amont d'une expédition à Cigéo.

Les actions de R&D déjà menées ont permis d'évaluer les vitesses de transformation du sodium résiduel en condition de stockage sous air et d'identifier la voie de la carbonatation comme procédé pertinent pour la stabilisation du sodium métallique sous forme de carbonate. L'efficacité de ce procédé repose sur l'accessibilité au réactif de l'ensemble du sodium, par exemple via une découpe préalable. Le CEA assure une veille sur l'état des connaissances sur l'élimination du sodium contenu dans les aiguilles absorbantes des RNR-Na ainsi que sur les techniques disponibles pour la découpe des aiguilles absorbantes des RNR-Na qui constitue un enjeu préalable au traitement du sodium résiduel.

Ces développements constituent un socle sur lequel le CEA pourra s'appuyer pour définir la stratégie de reprise en lien avec les conditions d'acceptation à Cigéo (valeur seuil d'acceptation pour le sodium).

VI.8 EFFLUENTS DE VALDUC (F2-6-03)

Suite à l'arrêt de l'envoi des effluents très actifs (ETA) de Valduc à l'atelier de vitrification de Marcoule, la DAM a lancé des études en vue de traiter ses effluents très actifs par un procédé de vitrification In Can (élaboration et solidification du verre directement dans un pot de fusion utilisé comme conteneur primaire de stockage). Ainsi, une étude a été engagée pour définir une composition verrière, qualifier une installation pilote échelle 1 au moyen d'essais technologiques en conditions inactives et réaliser l'étude du comportement à long terme des verres de Valduc ; l'objectif étant de constituer des colis définitifs de déchets MA-VL. Les études de R&D menées de 2008 à 2018 ont permis, non seulement de définir une formulation du verre pour les ETA (essais réalisés avec des solutions représentatives) mais aussi d'améliorer le procédé sur les aspects matériaux, fonctionnement et maintenabilité. Des avancées importantes ont été acquises pour permettre une conduite simple et pérenne du procédé. L'ensemble des connaissances et des résultats acquis est rassemblé dans un dossier procédé exhaustif pouvant servir de base à la mise en œuvre d'un futur atelier de vitrification des ETA de Valduc.

En pratique, les opérations de conditionnement définitifs des effluents produits avant 2015 devraient être menées à l'horizon 2040-2050.

VI.9 AUTRES DECHETS DESTINES A CEDRA OU DIADEM (DIV2-05, F2-5-05, F2-5-07)

La famille DIV2-05 regroupe un ensemble de déchets majoritairement métalliques et irradiants destinés à un entreposage d'attente sur l'installation DIADEM sans matrice. Les deux autres familles concernent des déchets compactables destinés à un conditionnement sur l'INB37A de Cadarache et un entreposage sur CEDRA (870L FI et 500L MI). Leurs origines sont variées, aussi seuls les chantiers d'A&D principaux sont identifiés ici :

Les déchets irradiants de l'INB72 à Saclay (fûts historiques entreposés en puits) sont destinés, selon leurs caractéristiques, soit à évacuation vers Cedra après conditionnement définitif, soit vers DIADEM (via une mise en conteneur sur ISAI). La zone des 40 puits est identifiée comme un chantier de priorité P1, avec une fin de conditionnement prévue en 2030. La fin de l'évacuation de ces déchets de l'INB 72 vers l'installation CEDRA ou vers l'installation DIADEM est prévue à l'horizon 2045.

La reprise des déchets irradiants situés dans les bâtiments 18 et 58 du site de Fontenay-aux-Roses est également une P1 du CEA. La reprise des poubelles historiques MI/MI entreposées dans les puits béton d'entreposage massif du bâtiment 58 nécessite la construction d'un Equipement de Mesures et Conditionnement (EMC). L'objectif est de disposer d'un équipement EMC prêt à être mis en service à la parution du nouveau décret de démantèlement de l'INB 166 mi-2026. Les colis produits sont destinés à un entreposage d'attente sur l'installation DIADEM avec une date de fin de reprise prévue en 2032. La reprise des déchets du bâtiment 18 pour mise en conteneur CDD devrait s'étaler jusqu'en 2040.

Le conditionnement de ces typologies de déchets ne requiert a priori aucune action de R&D spécifique : le conditionnement en 870L FI ou 500L MI est une opération industrielle éprouvée, et le conditionnement

Annexe au courrier DSSN 2021-619
Etat des lieux du conditionnement des déchets MAVL produits avant 2015

en conteneur CDD pour entreposage d'attente sur l'installation DIADEM relève des actions de R&D et qualification génériques à l'entreposage. Des caractérisations chimiques et radiologiques permettront d'identifier, les cas échéant, les besoins de R&D spécifiques.

VII. REFERENCES

- [1] Courrier CEA/DPSN/DIR 2017-280 « Calendrier associé à la réalisation du programme de recherche et développement envisagé pour la caractérisation et le conditionnement des déchets MA-VL produits avant 2015 »
- [2] Courrier CODEP-DRC-2021-012578 ; ASND/2021-00345
- [3] Courrier ASN-CODEP-DRC-2019-006483 ; ASND/2019-00413