

SYNTHESE

Ce document présente le programme de qualification des colis de déchets Moyenne Activité à Vie longue (MAVL) produits par EDF sur l'Installation de Conditionnement et d'Entreposage des Déchets Activés (ICEDA) et destinés in fine au stockage profond.

Ces déchets sont issus du démantèlement des réacteurs nucléaires de première génération, de Creys-Malville et de l'exploitation, de la maintenance et d'éventuelles modifications des réacteurs nucléaires du parc français actuel : ils correspondent aux familles élémentaires EDF-080 et EDF-090 identifiées dans le Programme Industriel de Gestion des Déchets (PIGD) de CIGEO.

Ce document est rédigé conformément aux exigences de l'arrêté INB [1] relatives au conditionnement des déchets destinés à des installations de stockage de déchets radioactifs à l'étude ainsi qu'aux exigences de la Décision N° 2017-DC-0587 relative au conditionnement des déchets radioactifs et aux conditions d'acceptation des colis de déchets radioactifs dans les installations nucléaires de base de stockage.

Il constitue la pièce n°2 du référentiel de conditionnement associé et est subordonné à l'accord de l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) en vue d'obtenir une autorisation de production des colis.

Il présente :

- Le programme de qualification du conteneur C1PG^{SP} ;
- Le programme de qualification du coulis cimentaire utilisé pour le blocage des déchets MAVL et le calage des paniers dans les colis C1PG^{SP} ;
- Le programme de qualification du colis fini C1PG^{SP} MAVL.

SOMMAIRE

1	EVOLUTION DU DOCUMENT.....	6
2	OBJET	6
3	DOCUMENTS DE REFERENCE	7
4	PROGRAMME DE QUALIFICATION DU CONTENEUR C1PG^{SP}	7
4.1	CONFORMITE AU PLAN SPECIFICATEUR	9
4.2	EPAISSEUR DE L'ENVELOPPE.....	9
4.2.1	Epaisseur de confinement.....	10
4.2.2	Epaisseur de tenue mécanique	10
4.2.3	Epaisseur dégradable du conteneur.....	10
4.2.4	Epaisseur minimale du conteneur	11
4.2.5	Epaisseur réelle de l'enveloppe externe de béton du colis	12
4.3	PERFORMANCE DE CONFINEMENT	12
4.4	CONSTITUANTS	14
4.4.1	Ciment.....	14
4.4.2	Granulats.....	14
4.4.3	Eau de gâchage	15
4.4.4	Adjuvants	15
4.4.5	Additions	15
4.5	FORMULATION DU BETON	15
4.5.1	Dosage du ciment	15
4.5.2	Fumées de silice	15
4.5.3	Rapport eau totale sur liant hydraulique	15
4.5.4	Formulation du béton.....	16
4.6	CARACTERISTIQUES MESUREES ET/OU SPECIFIEES DU BETON.....	17
4.6.1	Caractéristiques physico-chimiques	17
4.6.2	Caractéristiques mécaniques.....	18
4.7	CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU CONTENEUR	19
4.7.1	Absence de polystyrène	19
4.7.2	Parties métalliques du conteneur	19
4.7.3	Caractéristiques du système d'obturation.....	20
4.7.4	Continuité et homogénéité du conteneur	21
4.7.5	Caractéristiques complémentaires à mesurer	21
4.8	RESISTANCE AUX CYCLES THERMIQUES	22
5	PROGRAMME DE QUALIFICATION DU COULIS CIMENTAIRE	22

5.1	FORMULATION DU COULIS	22
5.2	CARACTERISTIQUES MESUREES DU COULIS	23
5.2.1	Caractéristiques physico-chimiques	23
5.2.2	Caractéristiques mécaniques	26
6	PROGRAMME DE QUALIFICATION DU COLIS FINI.....	27
6.1	MASSE MAXIMALE DU COLIS FINI.....	27
6.2	CARACTERISTIQUES MECANIKES	27
6.2.1	Gerbage	27
6.2.2	Chute	28
6.3	COMPORTEMENT THERMIQUE DU COLIS	29
6.3.1	Comportement thermique du colis en phase de blocage des déchets.....	29
6.3.2	Comportement thermique des colis en phase d'entreposage	35
6.4	RADIOLYSE EN SITUATION D'ENTREPOSAGE SUR ICEDA.....	39
6.4.1	Configurations enveloppes et pénalisantes de colis de déchets	41
6.4.2	Evaluation du débit de dose dans les colis	43
6.4.3	Evaluation de la production d'hydrogène de radiolyse	44
6.4.4	Capacité du colis C1PG ^{SP} MAVL ICEDA à évacuer l'hydrogène de radiolyse.....	47
6.4.5	Résistance mécanique du colis C1PG ^{SP} MAVL ICEDA sous l'effet de la radiolyse	48
6.5	DURABILITE DU COLIS DANS LE TEMPS	50
6.5.1	Le retrait.....	51
6.5.2	Retrait par séchage/dessiccation.....	51
6.5.3	Carbonatation du béton et corrosion des armatures.....	53
6.5.4	Corrosion par aération différentielle	55
6.5.5	Alcali-réaction	56
6.5.6	Réaction sulfatique interne	58
6.6	TENUE AU FEU DES COLIS.....	59
6.7	TENUE DES COLIS A L'IRRADIATION	60
6.8	INTEGRITE MECANIQUE DU COLIS A RECEPTION A CIGEO	60
7	COMPORTEMENT A LONG TERME DU COLIS EN SITUATION DE STOCKAGE GEOLOGIQUE PROFOND ET LE RELACHEMENT DES RADIONUCLEIDES62	
7.1	FAMILLE DE COLIS EDF-080 : COLIS C1PG DE DAE REP.....	62
7.2	FAMILLE DE COLIS EDF-090 : C1PG DE DAD 1ERE GENERATION	63
8	QUALIFICATION DU PROCEDE DE FABRICATION DES COLIS MAVL SUR ICEDA	63

1 EVOLUTION DU DOCUMENT

Indice	Modifications
A	Création du document
B	Intégration des éléments de réponses aux questions et recommandations de l'IRSN ainsi qu'aux questions et avis technique de l'Andra.
C	Nom de l'unité d'ingénierie modifié, corps du texte inchangé hors modification de forme..

2 OBJET

Ce document présente le programme de qualification des colis de déchets Moyenne Activité à Vie longue (MAVL) produits par EDF sur l'Installation de Conditionnement et d'Entreposage des Déchets Activés (ICEDA) et destinés in fine au stockage profond.

Ces déchets sont issus du démantèlement des réacteurs nucléaires de première génération, de Creys-Malville et de l'exploitation, de la maintenance et d'éventuelles modifications des réacteurs nucléaires du parc français actuel : ils correspondent aux familles élémentaires EDF-080 et EDF-090 identifiées dans le Programme Industriel de Gestion des Déchets (PIGD) de CIGEO.

Ce document est rédigé conformément aux exigences de l'arrêté INB [1] relatives au conditionnement des déchets destinés à des installations de stockage de déchets radioactifs à l'étude ainsi qu'aux exigences de la Décision N° 2017-DC-0587 relative au conditionnement des déchets radioactifs et aux conditions d'acceptation des colis de déchets radioactifs dans les installations nucléaires de base de stockage.

Il constitue la pièce n°2 du référentiel de conditionnement associé et est subordonné à l'accord de l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) en vue d'obtenir une autorisation de production des colis.

Il présente :

- Le programme de qualification du conteneur C1PG^{SP}¹ et du béton qui le constitue;
- Le programme de qualification du coulis cimentaire utilisé pour le blocage des déchets MAVL et le calage des paniers dans les colis C1PG^{SP};
- Le programme de qualification du colis fini C1PG^{SP} MAVL.

Les essais réalisés dans le cadre du programme de qualification de la présente note ont généralement été menés suivant des conditions normales décrites dans les normes et ne tenant donc pas systématiquement compte des conditions réelles auxquelles seront soumis les matériaux, en particulier concernant la température. Néanmoins, ce programme présente les dispositions constructives considérées dans la fabrication des colis et la démonstration que ces conditions conduisent à l'absence d'impact préjudiciable à l'intégrité mécanique des colis en particulier du fait de la thermique, de la radiolyse et de l'irradiation.

¹ SP signifie Sans Polystyrène

3 DOCUMENTS DE REFERENCE

[1] Arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base

[2] []

[3] []

[4] []

[5] []

[6] []

[7] []

[8] []

[9] []

[10] []

[11] []

[12] []

[13] []

[14] []

[15] []

[16] []

[17] []

[18] []

[19] []

[20] []

[21] []

[22] []

[23] D305615009088 ind C: Projet ICEDA – Référentiel de conditionnement des déchets MAVL. Pièce n°1 : spécifications de production et d'entreposage des colis C1PG^{SP}

**Projet ICEDA - Référentiel de conditionnement des déchets MAVL.
Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PGSP**

ING/DP2D/LP1-DS

Référence :

D305615010794

Indice :

C

Page 8/65

- [24] D305615010794 ind C: Projet ICEDA – Référentiel de conditionnement des déchets MAVL. Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PG^{SP}
- [25] D305615010796 ind C – Projet ICEDA – Référentiel de conditionnement des déchets MAVL – Pièce n°3 : plan de contrôles du procédé et des colis C1PG^{SP}
- [26] Dossier de demande d'Autorisation de Mise en Service d'ICEDA. Pièce n°1 – Rapport de Sûreté – Chapitre 4 : Description de l'installation
- [27] []
- [28] []
- [29] []
- [30] []
- [31] []
- [32] []
- [33] []
- [34] []
- [35] []

4 PROGRAMME DE QUALIFICATION DU CONTENEUR C1PG^{SP}

Adapté du concept du conteneur C1PG en béton durable et confinant, utilisé par EDF pour le conditionnement des déchets Faible et Moyenne Activité à Vie courte (FMA-vc) et qualifié par l'Andra au sens des spécifications du Centre de Stockage de l'Aube (CSA), le conteneur C1PG^{SP} utilisé sur ICEDA est constitué d'une coque en Béton armé Hautes performances (BHP) et d'un bouchon de même formulation.

Afin d'éliminer à la source le risque de production d'hydrogène de radiolyse à partir de matériaux organiques, ce colis ne dispose pas de vinyle, ni de polystyrène, tels que classiquement inclus entre la virole métallique servant de moule interne au conteneur et le béton coulé de celui-ci. Le volume équivalent est occupé par le béton.

Le béton actuellement utilisé pour la fabrication des conteneurs C1PG^{SP} est un béton de formulation EDF. L'adjuvant superplastifiant associé peut être choisi parmi une gamme de plusieurs adjuvants retenus par EDF. Ce

béton ou un béton dérivé répondant aux mêmes exigences (par exemple, une version autoplaçante de béton) sera utilisé sur la durée d'exploitation d'ICEDA.

4.1 CONFORMITE AU PLAN SPECIFICATEUR

Les caractéristiques géométriques des conteneurs C1PG^{SP} sont les suivantes (cf. plans en annexe 1) :

Caractéristique géométrique	Dimension (mm)
Diamètre	[]
Hauteur	[]
Hauteur entre la surface de la coque et le haut de la gouttière	[]
Hauteur entre la surface de la coque et le bas de la gouttière	[]
Epaisseur de béton du bouchon	[]
Epaisseur de béton de voile Epaisseur de béton du fond De manière très localisée, épaisseur de béton au droit de la gorge de manutention	[]
Incluant l'épaisseur de la virole métallique Epaisseur de voile Epaisseur de fond	[]
Masse théorique à vide du C1PG^{SP}	[]

Caractéristiques géométriques du conteneur C1PG^{SP}

Les conteneurs béton de type C1PG^{SP} sont conformes au plan spécificateur Andra C.PL.AETI.11.0079.A. Les critères de ce plan sont vérifiés dans le cadre des audits annuels de surveillance du fournisseur de ces conteneurs.

4.2 EPAISSEUR DE L'ENVELOPPE

En l'absence d'exigence particulière relative à la définition à ce stade des spécifications préliminaires d'acceptation des colis MAVL à CIGEO, la démonstration présentée ci-après traite, en s'appuyant sur le référentiel d'exigences actuelles du CSA, de la garantie du confinement porté par l'enveloppe externe du colis C1PG^{SP} en béton durable (conteneur + bouchon) sur la durée d'entreposage à ICEDA et sur la phase d'exploitation réversible du stockage CIGEO.

Les performances de confinement du colis C1PG^{SP}, au sens des exigences du CSA, sont garanties par les caractéristiques de l'enveloppe du conteneur à travers les caractéristiques du béton et son mode de mise en œuvre. Le maintien du confinement repose sur la durabilité du conteneur et sa résistance aux chargements mécaniques pendant 300 ans.

A chacune des trois fonctions que sont : le confinement des radionucléides, le transfert des charges mécaniques et la protection du colis pendant 300 ans, sont associées des épaisseurs minimales à garantir :

- Epaisseur de béton nécessaire au confinement : l_{conf} à garantir par l'enveloppe ;
- Epaisseur de béton nécessaire à la tenue sous charge : $l_{méca}$ à garantir par le conteneur ;
- Epaisseur du conteneur potentiellement dégradable : l_{deg} . Cette épaisseur du conteneur est « sacrifiée » à la dégradation chimique.

Pour les colis C1PG^{SP} MAVL, l'objectif est donc de garantir la durabilité de l'enveloppe au regard des fonctions précédemment listées, pendant la durée de l'entreposage à ICEDA puis du stockage réversible à CIGEO des colis, soit pour une durée de l'ordre de 150 ans, inférieure à la durée de 300 ans associée à la période de surveillance du CSA pour laquelle cette durabilité est déjà démontrée.

4.2.1 Epaisseur de confinement

L'épaisseur de confinement l_{conf} du colis C1PG^{SP} est liée aux propriétés de diffusion à l'eau tritiée du béton mis en œuvre et donc au coefficient de diffusion « D_e » à l'eau tritiée (cf. §4.3). Les résultats d'essais de diffusion à l'eau tritiée réalisés sur le béton du colis C1PG^{SP} permettent à l'aide de la formule proposée par l'Andra dans le référentiel d'exigences du CSA de déterminer la valeur de l'épaisseur de confinement du béton :

$$D_e = 1,75^{E-12} \times l_{conf}$$

Avec une valeur expérimentale $D_e = []$ m²/s retenue suite à la mesure réalisée en 1996 par EDF sur le béton du colis C1PG (même béton que C1PG^{SP}) selon l'épreuve technique ad hoc validée par l'Andra.

$$l_{conf} = [] \text{ cm}$$

Cette valeur de l'épaisseur de confinement du béton du colis C1PG de [] cm est une valeur validée par l'Andra dans le cadre des agréments en cours pour l'acceptation de déchets FMA-vc au CSA.

Cette épaisseur de confinement est inférieure à celle de l'enveloppe (e_{tot}) à laquelle l'épaisseur potentiellement dégradable du conteneur (l_{deg}) a été soustraite :

$$l_{conf} < e_{tot} - l_{deg}$$

4.2.2 Epaisseur de tenue mécanique

L'épaisseur de tenue mécanique du colis est définie par sa tenue, sans rupture, à une charge mécanique représentant une pression de 0,35 MPa appliquée à la section horizontale du colis. Elle est égale à [] cm compte tenu des propriétés mécaniques du béton mis en œuvre sur le colis C1PG^{SP}.

La valeur de l'épaisseur de tenue mécanique du colis C1PG de [] cm est une valeur validée par l'Andra dans le cadre des agréments en cours pour l'acceptation de déchets FMA-vc au CSA.

$$l_{méca} = [] \text{ cm} < e_{cont} - l_{deg}$$

4.2.3 Epaisseur dégradable du conteneur

L'épaisseur dégradable du béton du colis telle que mentionnée au paragraphe 4.2.1 correspond à une épaisseur « fusible ou sacrifiée » face au phénomène de lixiviation de la face externe du colis au contact à terme du béton avec l'eau « pure » du site, en situation de stockage (cf. exigences actuelles du CSA, référence ACO.SP.ASRE.99.004C),

Cette épaisseur dégradable n'est en conséquence pas comptabilisée dans la démonstration d'une garantie du confinement porté par le colis en situation d'entreposage à ICEDA ou en situation de stockage durant la période d'exploitation réversible de CIGEO puisque le colis, durant ces phases, n'est pas en contact avec de l'eau.

L'estimation de cette épaisseur dégradable en situation d'entreposage à ICEDA ou en situation de stockage en phase d'exploitation réversible à CIGEO est donc : $l_{deg} = 0 \text{ cm}$.

En situation de stockage à terme, cette épaisseur dégradable est évaluée comme suit :

- 2 cm si $P/L \text{ (en \%)} \leq 8,3 / (1+E/L)$
- 4 cm si $P/L \text{ (en \%)} > 8,3 / (1+E/L)$

Avec :

- P = la masse en portlandite du béton ;
- L = la masse de liant équivalent telle que définie dans la norme NF EN 206-1 ;
- P/L la teneur massique en portlandite du béton du conteneur mis en œuvre ;
- E/L le rapport eau totale/liant équivalent

La teneur massique en portlandite du béton mis en œuvre dans le conteneur C1PG^{SP} est de [].

Le rapport eau totale/liant équivalent est de [].

L'épaisseur dégradable retenue est donc : $l_{deg} = 4 \text{ cm}$ (cas pénalisant).

A noter cependant que, conformément à ce qui a été convenu entre l'Andra et EDF, EDF a transmis par courrier à l'Andra des éléments techniques qui permettent de justifier une épaisseur dégradable inférieure à 2 cm pour le béton d'EDF retenu dans le cadre de la fabrication des C1PG et C1PG^{SP} (cf. [3]).

En effet, pour un colis en situation de stockage, dans une alvéole fermée non ventilée, le béton du colis C1PG^{SP} constitue un bon candidat sur une période équivalente à la durée de réversibilité à CIGEO face aux attaques chimiques des ions chlorures et sulfate de l'eau de l'argile hôte, étant donné les points suivants :

- le choix d'un ciment CEM I PM-ES (Prise Mer – ie. ions chlorure – Eaux Sulfatées)
- son niveau de porosité et de propriétés de transfert faibles, du fait d'un choix granulométrique optimisé des constituants et d'une addition de fumées de silice permettant à la fois de fortement réduire la taille des pores de la pâte et de consommer la portlandite présente (caractère pouzzolanique) limitant ainsi sa lixiviation au contact de l'eau.

4.2.4 Epaisseur minimale du conteneur

L'épaisseur minimale théorique du conteneur est définie par l'Andra dans les exigences du CSA comme la somme de l'épaisseur dégradable et de la plus forte épaisseur entre l'épaisseur mécanique et celle de confinement :

$$e_{cont} = \max (l_{conf}, l_{méca}) + l_{deg}$$

soit $e_{cont} = [] \text{ cm}$ en situation d'entreposage à ICEDA ou en situation de stockage en phase d'exploitation réversible à CIGEO.

4.2.5 Epaisseur réelle de l'enveloppe externe de béton du colis

Telle qu'indiqué au paragraphe 4.1, l'épaisseur réelle nominale de béton des voiles du conteneur en partie courante est de [] mm avec en tolérance haute de fabrication [] mm et en tolérance basse -[] mm. Deux zones singulières de l'enveloppe externe du colis ont une épaisseur moindre : la zone de réduction de diamètre permettant l'accès au palonnier de manutention (épaisseur minimale de [] cm) ainsi que le bouchon de fermeture du colis (épaisseur minimale [] cm).

Ainsi :

	En entreposage à ICEDA En phase d'exploitation réversible à CIGEO	A CIGEO, au-delà de la phase d'exploitation réversible
La durabilité du conteneur est garantie pour une épaisseur minimale de conteneur égale à	[] cm ($l_{méca}$)	[] cm ($l_{méca}+l_{deg}$)
Le confinement du conteneur est garanti pour une épaisseur minimale de conteneur égale à	[] cm (l_{conf})	[] cm ($l_{conf}+l_{deg}$)

L'objectif de la présente note est de démontrer que les phénomènes susceptibles d'endommager l'enveloppe externe de béton du colis C1PG^{SP} MAVL d'ICEDA (conteneur et béton) sont maîtrisés au-delà des valeurs d'épaisseurs minimales de durabilité et de garantie du confinement, sur la période d'entreposage et de stockage réversible des colis.

4.3 PERFORMANCE DE CONFINEMENT

A réception au centre de stockage et au cours de la phase d'exploitation réversible, les colis primaires de déchets MAVL doivent être, en situation de référence, confinants. Le cas échéant, la fonction de confinement durant la phase d'exploitation réversible pourrait être reprise par le sur-emballage de stockage développé par l'Andra.

Le confinement du colis C1PG^{SP} est assuré par son enveloppe externe constituée du conteneur et de son bouchon coulé in situ en béton hautes performances.

La garantie de ces performances est apportée par :

- La mise en œuvre d'un béton homogène, lors de la fabrication du conteneur en usine de préfabrication ou bien lors de la coulée du bouchon sur ICEDA ;
- La conception de la tête du conteneur en « profil gouttière » et, en usine de préfabrication, la désactivation locale du béton du conteneur à l'interface avec le bouchon, permettant une bonne reprise de bétonnage lors de la coulée du bouchon (à ICEDA) au droit des granulats mis à nu ;
- Une formulation adaptée du béton permettant par un essai de diffusion de déterminer une porosité dynamique et un coefficient de diffusion effectif à l'eau tritiée « D_e » conformes aux exigences du CSA, en l'absence de spécifications préliminaires d'acceptation relatives à CIGEO.

Selon les exigences actuelles du CSA, les valeurs maximales acceptables pour les coefficients de diffusion effectifs à l'eau tritiée du matériau constitutif de l'enveloppe sont proportionnelles à l'épaisseur de confinement l_{conf} définie au § 4.2.1 selon la relation :

$$D_e = 1,75 \cdot 10^{-12} \times l_{conf}$$

**Projet ICEDA - Référentiel de conditionnement des déchets MAVL.
Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PGSP**

ING/DP2D/LP1-DS

Référence :

D305615010794

Indice :

C

Page 13/65

La relation précédente est définie dans l'épreuve technique Andra ET053 uniquement à partir du coefficient de diffusion déterminé par diffusion naturelle selon le mode opératoire décrit dans cette épreuve technique.

Pour le conteneur C1PG^{SP}, l'essai de diffusion à l'eau tritiée a été réalisé selon deux méthodes et pour 3 adjuvants utilisés dans la formulation béton d'EDF.

L'essai a d'abord été réalisé suivant une 1^{ère} méthode par électromigration sous courant continu (méthode dite « EMIG »). Cette méthode n'avait pas pour objectif l'évaluation du coefficient de diffusion, mais visait à comparer les performances du béton utilisé pour la conception des conteneurs C1PG^{SP} par rapport à celles de la formulation historique qualifiée par l'Andra.

Les résultats obtenus sont du même ordre de grandeur et permettent ainsi de garantir les propriétés confinantes de l'enveloppe externe du colis.

	Béton historique	Béton actuel (Adjuvant 1)	Béton actuel (Adjuvant 2)	Béton actuel (Adjuvant 3)
D _e EMIG (m ² /s)	[]	[]	[]	[]
Porosité (%)	/	[]	[]	[]

Résultats de l'essai de diffusion selon la méthode EMIG

Nota : Ces résultats ne sont pas tracés dans un document d'essais car ils correspondent à des résultats fournis par le CEA dans le cadre d'essais complémentaires à un programme contractualisé arrivant à échéance. Ces derniers essais avaient vocation à faire avancer le niveau de connaissances du CEA et d'EDF avant la fermeture du laboratoire LITEN du CEA de Grenoble. A noter néanmoins que cette méthode, discutée lors du groupe de travail Andra/Producteur, n'a pas été retenue à l'issue de la montée de version de l'épreuve technique ACO.SP.ASRE.000.053 du CSA à l'indice C.

Conformément aux échanges Andra/EDF de 2013, l'essai de diffusion a donc été réalisé suivant un 2nd principe expérimental selon la méthode du champ électrique sous courant continu développé par le CEA Cadarache, avec le même objectif : comparer les performances des matériaux de la formulation actuelle à celles de la formulation historique qualifiée par l'Andra.

Les résultats des mesures de coefficient de diffusion sous champ électrique sont reportés ci-dessous [7] :

	Béton actuel (Adjuvant 1)	Béton historique
Porosité moyenne estimée (%)	[]	[]
D _e moyen (m ² /s)	[]	[]

Résultats de l'essai de diffusion selon la méthode du champ électrique sous courant continu

Ces résultats montrent que les bétons actuel et historique sont similaires en termes de diffusion sous champ électrique. Les résultats moyens sont même légèrement meilleurs avec le nouvel adjuvant superplastifiant.

Cette méthode n'a pas été appliquée au béton avec adjuvant 2 ou 3 tels que mentionnés ci-avant. Ces adjuvants constituent une solution de substitution à l'adjuvant 1 pris pour référence dans la fabrication des colis à la mise en service d'ICEDA. S'il s'avère nécessaire de déployer l'un ou l'autre de ces adjuvants dans l'avenir, les

compléments aux dossiers réglementaires seront fournis si besoin aux administrations concernées pour régularisation et demande d'acceptation.

Compte tenu des incertitudes affichées, les propriétés des deux bétons peuvent être considérées comme comparables. Ce constat est également applicable aux autres adjuvants pour lesquels le béton actuel présente des valeurs très similaires pour tous les autres paramètres (masse volumique, porosité, ...).

A noter qu'au stade actuel des recherches, les différentes méthodes précitées ne permettent qu'une mesure comparative entre éprouvettes de béton testées sans qu'une valeur absolue ne soit exploitable.

La valeur de référence du coefficient de diffusion à retenir dans la caractérisation des conteneurs béton EDF est celle mesurée en 1996 selon l'épreuve technique (cf. ET053 de l'Andra, référence ACO SP ASRE 00 053) validée par l'Andra [6] :

$$D_e = [] \text{ m}^2/\text{s} \text{ soit } l_{\text{conf}} = [] \text{ cm}$$

4.4 CONSTITUANTS

4.4.1 Ciment

Le ciment qui entre dans la composition des saches de béton et de coulis est de type CEM I 52,5 N CE PM SR5 CP2 NF, fourni par des cimentiers français, titulaires du droit d'usage de la marque NF et conforme à la norme NF EN 197-1 (2012). Il appartient à une classe de résistance minimale garantie définie à 52,5 MPa selon les normes pré-citées.

Des essais de contrôle de fabrication (SO_3 , Cl, MgO, Na_2O équivalent, perte au feu et insolubles) sont réalisés par le fournisseur de ciment sur des échantillons prélevés à une fréquence régulière.

4.4.2 Granulats

Les granulats utilisés sont conformes aux normes NF EN 12620 et NF P 18-545. Ils sont non gélifs au sens de la norme NF P18-545. Les sables utilisés sont composés de matériaux siliceux alluvionnaires roulés. Les gravillons sont de nature silico-calcaire, de type alluvionnaire roulé.

Pour les gravillons, il est demandé 1 à 2 classes, de même origine. Leur granularité doit être comprise dans les limites du fuseau spécifié, avec $d=[]$ mm et $D=[]$ mm.

La teneur en ions chlorures est évaluée selon la norme NF EN 1744-1. La teneur en chlorures des granulats est inférieure à 0,05%.

La teneur en ions sulfites (SO_3) est mesurée suivant la norme NF EN 1744-1. La teneur en ions sulfites est inférieure à 0,2% (teneur en en soufre total < 0,4%).

L'humidité des granulats est contrôlée selon la norme NF EN 1097-5.

L'étendue granulaire de chaque sable élémentaire est limitée à 3-4 tamis successifs afin d'apporter une constance du fuseau granulométrique. Les sables élémentaires sont répartis sur la courbe granulaire du sable recomposé. Il en est de même pour les graviers.

Concernant la réaction alcali-granulats, le choix dans les formulations cimentaires développées pour le colis ICEDA porte sur des granulats dont on maîtrise l'alcali-réaction au sens de la normalisation (teneurs en alcalins du ciment et des granulats maîtrisées). Des essais de performance concernant la réactivité de la formule béton

vis-à-vis de l'alcali-réaction sont réalisés suivant la norme NF P 18-454. L'expansion des éprouvettes doit rester inférieure à 0,02% à 9 mois ou 1 an si le mélange granulaire est PR (ie. potentiellement réactif).

4.4.3 Eau de gâchage

L'eau ne doit pas contenir d'éléments nuisibles en quantités telles qu'ils pourraient porter préjudice à la prise, au durcissement et à la durabilité du béton ou provoquer une corrosion des armatures. Ses caractéristiques sont conformes à la norme NF EN 1008. L'eau doit être propre et ne pas contenir plus de 2g/l de Matières En Suspension (MES) ou de sels dissous et pas plus de 0,1% d'ions chlorures. Des analyses sont faites chez le fabricant des conteneurs béton pour contrôler ces paramètres. L'eau de gâchage utilisée sur ICEDA est issue du circuit d'eau potable. Elle est conforme à ces exigences.

4.4.4 Adjuvants

Les adjuvants pouvant être utilisés dans la formulation du béton de la coque C1PG^{SP} et du bouchon sont conformes aux normes NF EN 934-1, NF EN 934-2 et NF EN 934-6 et sont admis à la marque NF adjuvants.

4.4.5 Additions

Les fumées de silice qui entrent dans la composition des charges sèches sont conformes à la norme NF EN 13263-1.

4.5 FORMULATION DU BETON

4.5.1 Dosage du ciment

La valeur spécifiée pour la masse de ciment est $\geq 400 \text{ kg/m}^3$ de béton.

4.5.2 Fumées de silice

La formulation de base impose une proportion de fumée de silice par rapport au ciment égale à []%.

4.5.3 Rapport eau totale sur liant hydraulique

Le rapport massique eau totale sur liant hydraulique E/L est défini de la façon suivante :

$$E/L = \text{Eau totale} / (\text{Ciment} + kA)$$

Avec :

- Eau totale = eau libre + eau granulats + eau adjuvants
- A = additifs pris en compte pour le liant hydraulique
- k = 2 pour les fumées de silice.

Le rapport eau totale sur liant équivalent E/L est $\leq []$.

4.5.4 Formulation du béton

[]

La plage de dosage maximale a vocation à fixer une exigence dimensionnelle sur le matériel afin que celui-ci soit apte à un changement ultérieur d'adjuvant dont le dosage pourrait différer fortement du dosage mentionné dans le tableau précédent.

Le béton est constitué d'une seule charge comprenant tous les constituants secs de la formulation. Le cycle de malaxage est le suivant :

T_{0m} = début du malaxage à sec (compté à partir de la fin de la vidange de la poche, le malaxeur tourne dès le début de la vidange) ;

$T_{0m} + 1$ minute (± 10 secondes) : introduction de l'eau + adjuvant superplastifiant ;

$T_{0m} + 5$ minutes (± 10 secondes) : arrêt du malaxeur, contrôle de l'ouvrabilité (cf. § ci-après).

Ainsi, selon le résultat du contrôle de l'ouvrabilité, deux solutions s'offrent à l'opérateur :

- L'ouvrabilité est conforme : La vidange est réalisée, malaxeur tournant, après une reprise du malaxage durant 10 à 20 secondes.
- L'ouvrabilité est non conforme :
 - Si le béton nécessite un ajout d'adjuvant, une reprise du malaxage durant 1 minute est nécessaire suite à cet ajout. Un nouveau contrôle de l'ouvrabilité du béton est réalisé. Si celle-ci s'avère conforme, la



**Projet ICEDA - Référentiel de conditionnement des déchets MAVL.
Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PGSP**

ING/DP2D/LP1-DS

Référence :

D305615010794

Indice :

C

Page 17/65

vidange est réalisée après une reprise du malaxage durant 10 à 20 secondes, malaxeur tournant. A noter que le nombre d'ajouts est limité à deux, sans excéder la quantité maximale d'adjuvant admissible dans la gâchée. Si à l'issue de deux ajouts d'adjuvants l'ouvrabilité est toujours non conforme, la gâchée est rebutée.

- Si l'ouvrabilité montre une fluidité excessive (probablement en lien avec un excès d'adjuvant) la gâchée est rebutée.

L'adjuvant superplastifiant [] est l'adjuvant de substitution de référence de l'adjuvant initialement utilisé dans la formulation. Ce premier adjuvant a en effet été classé CMR en interne EDF et a dû être remplacé sans apport d'autre modification sur les constituants granulaires ou le dosage en eau du béton. Le choix du nouvel adjuvant permet aux propriétés mécaniques du béton d'être très voisines des propriétés du béton avec l'ancien adjuvant. Ce béton relève de la classification d'un béton à hautes performances.

Considérant le nouvel adjuvant de référence, EDF ne relève pas à ce jour d'augmentation des taux d'apparition de fissuration des bouchons des colis confectionnés sur le parc en exploitation pour les déchets FMA-vc.

La formulation du béton telle qu'actuellement développée pour les besoins d'ICEDA et du parc en exploitation ne comprend pas de retardateur. Sur ICEDA, l'équipement de préparation des formulations cimentaires dispose de la possibilité d'une adjuvantation supplémentaire, en réserve, s'il fallait faire évoluer la formulation dans l'avenir avec introduction d'un retardateur de prise.

4.6 CARACTERISTIQUES MESUREES ET/OU SPECIFIEES DU BETON

4.6.1 Caractéristiques physico-chimiques

4.6.1.1 Durée pratique d'utilisation et ouvrabilité du béton

La Durée Pratique d'Utilisation (DPU) est la durée suivant la fin de fabrication de la gâchée pendant laquelle le béton frais conserve une ouvrabilité satisfaisante permettant une utilisation conforme. La DPU est susceptible de varier sous l'influence de facteurs, tels que la température, l'hygrométrie, la variabilité des constituants de la formulation.

Cette DPU est respectée tant que l'essai normalisé d'ouvrabilité au cône d'Abrams est conforme : les valeurs cibles d'ouvrabilité à respecter sont relatives à un affaissement au cône d'Abrams selon la norme NFEN12350-2 compris entre 210 et 240 mm pour un béton dont la température est comprise entre 5 et 30°C (cf. § 11.1.2.3 de la Pièce 1). Ces valeurs non figées sont adaptables à l'issue des essais inactifs de l'installation.

La DPU du béton de bouchage du colis ICEDA est considérée de deux heures (cf. § 11.1.3.3 de la Pièce 1).

L'ouvrabilité du béton est mesurée au cône d'Abrams à chaque campagne de bouchage, pour chaque gâchée avant vidange du malaxeur, sachant qu'une gâchée correspond au bouchage d'un colis. Un béton dont la valeur d'affaissement au cône d'Abrams est en dehors de la fourchette spécifiée ci-avant à l'issue d'éventuels ajouts d'adjuvants ou pour lequel le temps d'utilisation excède la DPU est systématiquement rebuté.

A chaque campagne de bouchage (ie. bouchage d'un maximum de 5 colis nécessitant donc 5 gâchées conformes), un prélèvement sur une des gâchées permet de réaliser une mesure d'ouvrabilité à deux heures pour contrôler à échéance régulière la stabilité de la valeur de deux heures de la DPU du béton.

4.6.1.2 Retrait total à 28 jours

Les mesures de retrait total sur le béton ont été réalisées selon la norme NF P 18-427 (Norme béton) sur des éprouvettes prismatiques de dimensions : 7 × 7 × 28 cm après démoulage à 24 heures. Les prismes sont conservés dans une enceinte régulée à 20 ± 2°C et à 65 ± 5 % d'humidité relative.

La valeur moyenne sur 3 éprouvettes pour chaque adjuvant testé est < 400 µm/m [8] :

- [] µm/m (Adjuvant 1) ;
- [] µm/m (Adjuvant 2) ;
- [] µm/m (Adjuvant 3).

4.6.1.3 Perméabilité au gaz

Des mesures du coefficient de perméabilité au gaz sur le béton ont été réalisées suivant l'épreuve technique ACO.SP.ASRE.00-062.ind. B du CSA. Les résultats sur des éprouvettes de béton (Adjuvant 1 de référence, adjuvant 2 et 3 de substitution) sont les suivants (cf.,[5] [9]):

[]

Coefficient de perméabilité au gaz

(*) : Limite de détection de l'appareillage

4.6.1.4 Masse volumique et porosité du béton

La masse volumique du béton est de 2470 kg/m³ à l'état frais. La porosité moyenne est évaluée à 7% (cf [9]).

4.6.1.5 Composition élémentaire

[]

4.6.1.6 pH de la solution interstitielle du béton

Le pH de la solution interstitielle du béton n'a pas fait l'objet de mesure. Néanmoins, les données de la littérature indiquent des valeurs de pH comprises entre 12,5 et 13 pour un béton « courant » par opposition aux bétons dits « bas pH ».

4.6.2 Caractéristiques mécaniques

4.6.2.1 Résistance en compression

La résistance en compression à 90 jours a été mesurée suivant la norme NF EN 12390-3 sur des éprouvettes cylindriques.

La valeur moyenne pour chaque adjuvant testé est ≥ 50 MPa. Les résultats sont les [8] :

- [] MPa (Adjuvant 1) ;
- [] MPa (Adjuvant 2) ;
- [] MPa (Adjuvant 3).

4.6.2.2 Résistance en traction par fendage

La résistance en traction par fendage à 90 jours a été mesurée suivant la norme NF EN 12390-6. La valeur moyenne pour chaque adjuvant testé est $\geq 4,5$ MPa. Les résultats sont les [8] :

- [] MPa (Adjuvant 1) ;
- [] MPa (Adjuvant 2) ;
- [] MPa (Adjuvant 3).

4.7 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU CONTENEUR

4.7.1 Absence de polystyrène

Comme évoqué en introduction du paragraphe [1], le C1PG^{SP} ne dispose pas de l'épaisseur de polystyrène entre la virole métallique interne de la coque et le béton qui la constitue comme c'est le cas pour les conteneurs C1PG usuellement utilisés sur le parc nucléaire en exploitation pour la gestion des déchets FMA-vc destinés au CSA.

Cet isolant constitué par le polystyrène (maintenu autour de la virole métallique par un film vinyle) a vocation à gérer l'impact d'un effet thermique sur le conteneur C1PG lors du conditionnement de déchets dont la température est élevée ou pour lesquels une forte montée en température induit un gradient thermique.

A titre d'exemple, le procédé MERCURE de conditionnement de résines radioactives à vie courte du parc en exploitation met en œuvre un conditionnement des déchets par polymérisation d'une matrice polymère dont la vitesse de montée en température peut atteindre 7°C/heure pour une température de polymérisation inférieure à 90°C.

Concernant ICEDA, cet isolant polystyrène (ainsi que le film vinyle) a été supprimé afin d'éliminer son impact en matière de radiolyse et de répondre à une exigence potentielle de l'Andra vis-à-vis de la minimisation d'une présence de matière organique dans les alvéoles de stockage à CIGEO.

L'absence d'impact de cette suppression sur la tenue de la coque dans des conditions de mise en œuvre équivalentes à celles d'ICEDA a été vérifiée dans le cadre d'essais à l'échelle 1. La vitesse de montée en température à la prise observé notamment lors des essais réalisés en 2009 était au maximum de 3 à 4°C/heure. Le gradient résultant n'a pas occasionné d'impact thermique structurel sur le conteneur C1PG^{SP}.

4.7.2 Parties métalliques du conteneur

4.7.2.1 Ceinture de manutention

Les ceintures de manutention sont contrôlées après soudure. Dans le cas d'apparition de défaut au niveau du joint de soudure ou sur la ceinture (déformation, chocs), la ceinture de manutention est rebutée.

4.7.2.2 Armatures

L'armature métallique du C1PG est constituée de fil d'acier crantée de diamètre 6 mm en FeTE500 disposé en mailles de [] mm x [] mm, sauf au niveau de la tête de conteneur où le diamètre est de [] mm. Ces armatures sont conformes aux règles définies par la norme NF A35-015. Le maintien de chacune des armatures est obtenu par soudure électrique par point (le soudage au chalumeau est interdit). L'épaisseur d'enrobage externe de cette armature est de [] mm minimum au niveau de la tête du conteneur et de [] mm minimum au droit des parois du conteneur. La masse de l'armature est de [] kg

4.7.2.3 Virole interne métallique

La virole métallique servant de moule interne à la coulée du conteneur dispose d'une épaisseur de [] mm en paroi et [] mm en fond.

La masse volumique de l'acier qui la compose est de 7800 kg/m³.

Sa composition élémentaire massique est la suivante (désignation S 235 JR) :

C	P	S	Mn	N	Cu
≤ 0.17	≤ 0.045	≤ 0.045	≤ 1.4	≤ 0.009	≤ 0.55

4.7.3 Caractéristiques du système d'obturation

4.7.3.1 Nature des matériaux constituant le bouchon du colis

Le bouchon du colis C1PG^{SP} assure la continuité de l'enveloppe externe du colis : il est fabriqué avec le béton ayant la même composition et le même mode de mise en œuvre que le béton du conteneur lui-même.

4.7.3.2 Epaisseur

Le bouchon assure la continuité de l'enveloppe externe du colis, c'est-à-dire que son épaisseur doit a minima être égale à l'épaisseur minimale du conteneur (de [] cm cf. §4.2.4) afin de garantir le confinement des radionucléides par le conteneur. Au-delà, une marge est considérée fixant l'épaisseur minimale de béton du bouchon de fermeture du colis à 13 cm.

4.7.3.3 Géométrie du bouchon

Le bouchon présente une surface supérieure plane en décrochement (-5 mm,-20 mm) par rapport au plan matérialisé par le bord supérieur du conteneur. En fin de fabrication du colis, ce décrochement permet l'application d'une couche d'eau pour la cure. En phase d'entreposage, il permet l'absence d'effort mécanique directement sur le béton des bouchons des colis en situation de gerbage.

4.7.3.4 Etanchéité de la liaison entre le conteneur et le bouchon

Un essai d'étanchéité de la liaison entre le conteneur et le bouchon a été réalisé sur une coque C1PG.

Cet essai a été réalisé suivant l'épreuve technique ACO.SP.ASRE.00-066.ind. B du CSA à J+34 après la fabrication du bouchon [8].

Aucun débit sortant n'a été constaté durant toute la durée de l'essai [10]. De plus, aucune fissure n'a été observée au niveau de la liaison conteneur/bouchon lors de l'essai.

L'absence de polystyrène pour les colis C1PG^{SP} ne remet pas en cause les résultats de cet essai d'étanchéité.



**Projet ICEDA - Référentiel de conditionnement des déchets MAVL.
Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PGSP**

ING/DP2D/LP1-DS

Référence : D305615010794

Indice : C

Page 21/65

4.7.4 Continuité et homogénéité du conteneur

4.7.4.1 Examen du conteneur et de son bouchon

Des essais à l'échelle 1 ont été réalisés en mars 2008 sur des prototypes de colis C1PG^{SP} [11].

Dans le cadre de ces essais, les prototypes de colis ont fait l'objet d'une découpe transversale au câble diamanté.

Les observations après découpe montrent [12] :

- Une liaison bouchon/conteneur sans distinction de reprise de bétonnage et l'absence de discontinuité entre le béton du conteneur et celui du bouchon ;
- L'absence de fissuration du béton du bouchon, à la liaison bouchon/conteneur, à la surface du bouchon et à la liaison béton/virole où l'on a supprimé le polystyrène. L'absence d'isolant n'a donc pas pénalisé la réalisation de la coque ;

Nota : Une découpe étant susceptible de favoriser la fissuration du béton, les observations des surfaces sciées n'ont de réel intérêt que dans un délai très court à l'issue de celle-ci. En effet, après découpe, la relaxation des contraintes dans le béton rend les observations non représentatives d'un colis qui n'aurait pas subi de telles pratiques destructives.

- Un béton homogène dans l'épaisseur, peu de bullage et l'absence de ségrégation, que ce soit au niveau du bouchon comme du conteneur.

4.7.4.2 Essai d'étanchéité du conteneur vide

Un essai d'étanchéité du conteneur vide a été réalisé sur un conteneur C1PG 28 jours au moins après sa fabrication. Le conteneur vide a été complètement rempli d'eau. Aucune fuite d'eau ou trace d'humidité n'a été constatée sur les parois du conteneur suite au remplissage du conteneur (délai de l'essai : 8 jours, [13]).

L'absence de polystyrène pour les colis C1PG^{SP} ne remet pas en cause les résultats de cet essai d'étanchéité.

4.7.5 Caractéristiques complémentaires à mesurer

La masse volumique et la porosité du béton ont été déterminées suivant la norme NF P 18-459 (à plus de 90 jours).

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Echantillons	Masses volumiques apparentes moyennes (kg/m ³)		Porosité moyenne (%)
	Saturée	Séchée à 105°C	
Béton (Adjuvant 1)	2470	2400	8,0
Béton (Adjuvant 2)	2480	2400	7,5
Béton (Adjuvant 3)	2480	2400	7,7

Masse volumique et porosité du béton selon norme NF P 18-459 (à plus de 90 jours)

Des mesures supplémentaires ont été réalisées selon la procédure décrite dans l'épreuve technique ACO.SP.ASRE.00-062.ind.B. Les résultats obtenus sur la formulation de béton (Adjuvant 1) sont les suivants :

	Masses volumiques apparentes moyennes (kg/m ³)			Porosité moyenne (%)
	Saturée	Intermédiaire	Séchée à 105°C	
Béton (Adjuvant 1)	2480	2470	2410	7,0

Résultats complémentaires selon ET62**4.8 RESISTANCE AUX CYCLES THERMIQUES**

Un test de résistance aux cycles de gel-dégel a été réalisé sur des éprouvettes de béton après une période de cure de 90 jours selon l'épreuve technique ACO.SP.ASRE.00.050.ind.B du CSA.

L'allongement Δ/l est inférieur à 400 $\mu\text{m/m}$ [8]:

$$\Delta/l = [] \mu\text{m/m (Adjuvant 1) ;}$$

$$\Delta/l = [] \mu\text{m/m (Adjuvant 2) ;}$$

$$\Delta/l = [] \mu\text{m/m (Adjuvant 3).}$$

La variation de la fréquence de résonance est supérieure à 0,75 :

$$F^2/F_0^2 = [] \text{ (Adjuvant 1) ;}$$

$$F^2/F_0^2 = [] \text{ (Adjuvant 2) ;}$$

$$F^2/F_0^2 = [] \text{ (Adjuvant 3).}$$

Ces résultats attestent donc de la non-géllivité du béton au sens de l'épreuve technique ACO.SP.ASRE.00.050. ind. B.

5 PROGRAMME DE QUALIFICATION DU COULIS CIMENTAIRE**5.1 FORMULATION DU COULIS**

La formulation du coulis cimentaire a été développée par EDF.

La plage de dosage maximale à prévoir concernant le superplastifiant est de 0,5 à 12 kg/m³. Cette plage de dosage a vocation à fixer une exigence dimensionnelle sur le matériel afin que celui-ci soit apte à un changement ultérieur d'adjuvant dont le dosage pourrait différer fortement du dosage mentionné dans le tableau précédent.

Le coulis est constitué d'une charge de {ciment + fumées de silice}, de deux charges de filler siliceux, d'eau et d'adjuvants. Le cycle de malaxage est le suivant :

Introduction de l'eau + adjuvants ;

T_{0m} = début du malaxage ;

T_{0m} +1 minute (± 10 secondes) : Introduction lente de la moitié de la quantité de filler siliceux.

A l'issue : Introduction lente de la totalité du mélange ciment / fumée de silice ;

A l'issue: Introduction lente du reste du filler ;

A l'issue + 2 minutes (± 10 secondes) : fin du malaxage, vidange dans la cuve de maintien.

La durée précise de malaxage après introduction de l'ensemble des constituants (2 mn a priori dans le cycle ci-dessus) sera fixée à l'issue des essais inactifs avec le matériel industriel définitif.

Il n'y a pas d'ajout d'adjuvant en cas d'écart de fluidité. Si le coulis ne respecte pas la valeur de fluidité, il est rebuté.

Ce coulis est utilisé sur ICEDA pour bloquer les déchets dans le panier et caler le panier dans la coque C1PG^{SP}. Le rôle majeur de ce coulis est de limiter les vides dans le colis et de participer à la tenue mécanique du bloc de déchets. Il n'a pas vocation à assurer une fonction de confinement.

Ce coulis a été développé spécifiquement pour ICEDA : il présente des critères de rhéologie et de thermique adaptés au conditionnement de déchets MAVL (facilité de mise en œuvre industrielle et exothermie limitée).

5.2 CARACTERISTIQUES MESUREES DU COULIS

5.2.1 Caractéristiques physico-chimiques

5.2.1.1 Durée pratique d'utilisation et ouvrabilité du coulis

La Durée Pratique d'Utilisation (DPU) est la durée suivant la fin de fabrication de la gâchée pendant laquelle le coulis frais conserve une ouvrabilité satisfaisante permettant son utilisation.

Dans le procédé de blocage de l'installation ICEDA, le coulis de blocage des déchets fait l'objet de plusieurs gâchées déversées dans une cuve de maintien permettant par connexion avec un échangeur de chaleur de maintenir la température du coulis frais avant usage inférieure à 10°C. Aussi, le to de décompte de la DPU correspond au moment de la vidange de la première gâchée en cuve de maintien. Le « t » de fin est égal à to+DPU.

Cette DPU est respectée tant que l'essai normalisé de fluidité au cône de Marsh est conforme : la valeur cible de fluidité à respecter est de 40 secondes.

La DPU du coulis de blocage et de calage est considérée de quatre heures (cf. § 11.1.3. de la Pièce 1).

L'opération de blocage de chaque panier doit avoir lieu dans la durée de 4 heures de la DPU du coulis. Au-delà, le coulis est rebuté.

5.2.1.2 Qualité de l'immobilisation : taux de vide

Le développement d'une formulation ouvrable et très fluide (cf. exigence de fluidité au § 11.1.3.1 de la Pièce 1) concernant le coulis cimentaire ainsi que le choix d'une fermeture du colis par béton coulé in situ permettent au procédé de conditionnement des déchets en colis C1PG^{SP} de limiter les vides dans le colis.

L'objectif de ce coulis et de remplir les espaces entre les déchets ou entre le panier et le conteneur par simple coulée gravitaire.

La mise en œuvre de ce coulis sur des prototypes de colis à l'échelle 1 réalisés en 2006, 2008 et 2016 a permis de vérifier, après découpe au câble diamanté, le fort taux de remplissage des paniers. Les figures suivantes en attestent :



Prototype à l'échelle 1 de 2006, découpé le 30/11/06.

- Total remplissage du panier avec quantité faible de déchets reposant les uns sur les autres en fond.
- Total remplissage entre le panier et le conteneur.

Les déchets postiches reposent les uns sur les autres créant une zone dense en déchets en partie basse du prototype de colis. Néanmoins, le coulis de par sa fluidité pénètre à travers les vides laissés entre les déchets pour les remplir.



Prototype à l'échelle 1 de 2008, découpé le 06/03/08.

- Quasi-total remplissage du panier avec quantité plus importante de déchets massifs reposant les uns sur les autres.
- Total remplissage entre le panier et le conteneur.

Les déchets postiches reposent les uns sur les autres créant une zone dense en déchets dans un volume important du panier inclus dans le prototype de colis. Néanmoins, le coulis, de par sa fluidité, pénètre là aussi à travers les vides laissés entre les déchets pour les remplir.



Prototype à l'échelle 1 de 2016, découpé en fin 2016 (ie. plusieurs jours de découpe).

- Quasi-total remplissage du panier avec une quantité maximale de déchets représentatifs de crayons DAE (10 mm de diamètre, 10 cm de long) reposant les uns sur les autres.
- Total remplissage entre le panier et le conteneur.

Cette situation de remplissage correspond au cas le plus pénalisant qu'EDF estime rencontrer : l'amas de près de 2 tonnes de tronçons de crayons au contact des uns et des autres génère des volumes de vides minimisés et une perte de charge maximisée pouvant s'opposer à l'écoulement du coulis jusqu'au fond du panier. Néanmoins, le coulis de par sa fluidité pénètre là encore à travers les vides laissés entre les déchets pour tous les remplir.

En définitive, les observations après coupes démontrent l'absence de vides conséquents :

- Le coulis de ciment servant au blocage des déchets est d'aspect homogène sur le plan coloration ce qui indique l'absence d'agglomération de fumées de silice, filler ou ciment. La taille maximale de bulles observée est de diamètre 3 mm. La fissuration est quasi absente.
- Une même homogénéité de ce coulis de ciment est observée pour le calage du panier. La reprise de coulée en partie haute du panier liée au temps d'attente de prise entre l'opération de blocage des déchets et l'opération de calage du panier est visible. La faible épaisseur de coulis engagée fait l'objet d'une présence de quelques fissures verticales d'ouverture inférieure à 300 microns probablement liées à un retrait par dessiccation. Ce constat a été traduit dans le procédé industriel d'ICEDA par la mise en œuvre d'une opération de cure du coulis après l'opération de calage.
- Malgré quelques zones délicates à combler (par exemple sous la bride de manutention en tête de panier) les défauts de remplissage (air potentiellement bloqué sous les déchets) sont très limités et sans impact pour le blocage des déchets. Ce constat est lié à la grande fluidité du coulis.
- Une bonne adhérence entre les matériaux cimentaires avec le panier et la virole métallique interne du colis est constatée.

5.2.1.3 Retrait à 28 jours

Le retrait a été mesuré conformément à la norme NF P 15-433 02/94 sur des éprouvettes prismatiques, après démoulage à 24 heures, de dimensions 4 cm x 4 cm x 16 cm. Les prismes ont été conservés dans une enceinte régulée à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et à $65 \pm 5\%$ d'humidité relative de l'air.

Le retrait mesuré à 28 jours est de [] $\mu\text{m/m}$ ([14], [15]). Aucune fissuration ou défaut de surface n'a été constaté.

5.2.1.4 Degré de saturation

La masse volumique et la porosité à l'eau du coulis ont été mesurées sur des éprouvettes cylindriques ($\varnothing = 5,5 \text{ cm}$ h = 13 cm) ([16], [17]).



**Projet ICEDA - Référentiel de conditionnement des déchets MAVL.
Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PGSP**

ING/DP2D/LP1-DS

Référence :

D305615010794

Indice :

C

Page 26/65

Les résultats obtenus sont les suivants :

Masse volumique en l'état (t/m ³)	Masse volumique saturée (t/m ³)	Masse volumique sèche (t/m ³)	Porosité (%) à 90 jours
1,77	1,77	1,23	52 à 54%

Résultats de mesures de masse volumique et de porosité sur le coulis cimentaire

5.2.1.5 Masse volumique

La masse volumique du coulis est de 1737 kg/m³ à l'état frais.

5.2.1.6 Composition élémentaire

[]

(en pourcentage massique).

5.2.2 Caractéristiques mécaniques

5.2.2.1 Résistance à la compression

La résistance mécanique en compression (Rc) du coulis a été mesurée sur éprouvette, à 28 et à 90 jours, suivant la norme NF EN 12390-3.

Les résultats sont les suivants ([16], [18]) :

- Rc à 28 jours : [] à [] MPa ;
- Rc à 90 jours : [] à [] MPa.

5.2.2.2 Module d'élasticité statique

Le module d'élasticité statique en compression du coulis a été mesuré sur éprouvettes, à 28 et à 90 jours, suivant la norme ISO 1920 10.

Les résultats sont les suivants [18] :

- Module d'élasticité statique à 28 jours : [] GPa ;
- Module d'élasticité statique à 90 jours : [] GPa.

6 PROGRAMME DE QUALIFICATION DU COLIS FINI

6.1 MASSE MAXIMALE DU COLIS FINI

La masse maximale du colis C1PG^{SP} en sortie de process de conditionnement de déchets radioactifs sur ICEDA est de 6400 kg.

6.2 CARACTERISTIQUES MECANIQUES

6.2.1 Gerbage

A la date de réception du colis C1PG^{SP} MAVL sur CIGEO, considérant le scénario initial de l'Andra selon lequel ce colis est un colis primaire à conditionner dans un sur-conteneur de stockage, le colis C1PG^{SP} MAVL n'a pas vocation à être gerbé.

Néanmoins, considérant le scénario alternatif de stockage direct, désormais considéré comme scénario de référence par l'Andra, le colis C1PG^{SP} MAVL doit être qualifié au gerbage sur deux niveaux (ie. deux sur un) vis-à-vis de la tenue mécanique à la date de réception sur CIGEO.

La qualification du colis à cette exigence repose sur la démonstration de la tenue mécanique du colis et de la durabilité du colis dans le temps :

- Le colis C1PG^{SP} est un colis en béton hautes performances. Il constitue un colis béton durable et confinant conforme aux exigences de l'Andra vis-à-vis d'un stockage de surface au CSA (gerbage sur 6 niveaux en alvéole). Il garantit notamment une tenue sous charge de 0,35 MPa.
- Le colis C1PG^{SP} est équipé d'une ceinture de manutention métallique. Cette ceinture permet d'éviter toute dégradation du colis par contact béton/métal entre le dispositif de manutention et le colis.
- Par conception et déclinaison en phase de fabrication, la surface supérieure du bouchon de fermeture du colis est en retrait de quelques centimètres (5 à 20 mm) par rapport au haut des voiles du conteneur. Si cet écart permet la cure à l'eau du béton du bouchon après coulée, il permet également d'éviter toute sollicitation mécanique sur le bouchon en situation de gerbage. Les efforts mécaniques liés au gerbage des colis les uns sur les autres sont exclusivement repris par les voiles des conteneurs selon une contrainte majeure en compression.

Ainsi, le dimensionnement du colis C1PG^{SP} tant du point de vue mécanique (ie. forme, épaisseur, armatures, manutention) que de la composition du béton (tenue mécanique, gestion des risques pathologiques - ie. durabilité -, propriétés de confinement) répond aux exigences de l'Andra vis à vis du CSA pour l'acceptabilité des colis en béton durable. La démonstration de ces exigences traite, entre autres points, de la tenue mécanique du colis en situation de gerbage (ie. 6 niveaux en situation de stockage). Cette démonstration traite par ailleurs de la durabilité de ce concept de colis en béton durable pour une surveillance au CSA sur une période de 300 ans. Les éléments de cette démonstration sont disponibles dans les dossiers d'agrément acceptés par l'Andra pour les colis C1PG conditionnant les déchets radioactifs FMA-vc du parc en exploitation des réacteurs REP d'EDF.

La démonstration de la durabilité du colis dans le temps en situation d'entreposage à ICEDA, en particulier vis-à-vis de l'impact potentiel des conditions hydriques sur les performances du colis, est présentée au paragraphe 6.5.2.

6.2.2 Chute

Dans le cadre des exigences du CSA pour un colis en béton durable, le colis C1PG est dimensionné pour être qualifié à un essai de chute d'une hauteur de 1,2 m sur dalle indéformable.

Un essai de démonstration du comportement à la chute a été réalisé en 2008 à l'échelle 1 sur un colis représentatif d'un C1PG^{SP} MAVL ICEDA ([11], [12]).

Ce colis, sans film vinyle et sans polystyrène, comportait 2,5 tonnes de déchets métalliques. Son poids total était d'environ 6,5 tonnes. L'essai de chute s'est déroulé 7 jours après la date de fabrication du bouchon.

Les conditions de chute mises en œuvre étaient les suivantes :

- Bouchon de fermeture du colis vers le bas ;
- Inclinaison du colis de 45° (ordre de grandeur compte tenu de l'incertitude de mise en œuvre d'un objet lourd, suspendu tête vers le bas, au moyen d'un dispositif d'élingage réglé de manière manuelle);

- Réceptacle de chute indéformable :

La dalle ayant servi à l'essai de chute correspond à la dalle utilisée chez CDB (filiale SOCODEI, Chazay Bons dans l'Ain) dans le cadre des essais de démonstration de la tenue à la chute des colis C1PG de déchets FMA-vc destinés au CSA. Elle est donc conforme aux exigences particulières de l'Andra en la matière et en l'occurrence à l'ET 58.

Il s'agit d'une dalle comportant une plaque d'acier de section carrée de [] m de côté, de [] cm d'épaisseur, reposant et ancrée dans un massif en béton de [] m³ environ, d'une masse supérieure à [] tonnes.

- Hauteur de chute de 1,4 m (correspondant à la hauteur du colis augmentée de 10 cm pour prendre en compte un jeu nécessaire à sa manutention).
- Système de largage instantané ayant permis au colis de tomber verticalement selon les conditions définies ci-dessus.

Les critères de réussite de l'essai étaient :

- L'absence de dispersion de déchets hors du colis ;
- L'absence de mise à nu des déchets, visible à l'œil ;
- Le maintien de la fonction de protection biologique du colis.

Les résultats de cet essai de chute ont été concluants : les dégradations du colis sont restées très limitées. L'intégrité de la liaison bouchon/conteneur a été maintenue et la non-dispersion des déchets a été assurée.

La découpe du colis suite à l'essai de chute a démontré un béton de conteneur et de bouchon en très bon état et des liaisons entre constituants du colis de qualité.

Les résultats de ces essais ont ainsi permis de qualifier le colis C1PG^{SP} à une chute de 1,4 m et de démontrer que l'absence de polystyrène n'est pas préjudiciable à la résistance du colis à la chute.

Nota : les résultats des essais de tenue à la chute mentionnés ci-avant ont été réalisés sur la base du béton d'enveloppe du colis (ie. conteneur + bouchon) « historique », dit béton F44 dont l'utilisation d'un adjuvant classé CMR est désormais proscrit. Les recherches et essais d'adjuvants de substitution ont été menés à propriétés

mécaniques équivalentes du béton permettant de conserver une classification de béton à hautes performances dans l'évolution du béton F44 désigné désormais par F44Adj.

6.3 COMPORTEMENT THERMIQUE DU COLIS

La thermique des colis MAVL en phase de fabrication puis d'entreposage a fait l'objet d'une fiche Position & Action (cf. PA n°14 [2]).

Selon les déchets activés à conditionner sur ICEDA, les opérations de découpe/cisaillage des déchets réduiront singulièrement leur taille initiale. De fait, et selon leur géométrie, le remplissage du conteneur, plus précisément du panier, conduira à un foisonnement faible entre les déchets avec peu d'espaces vides au regard de ce qui est habituellement observé pour des pièces métalliques plus massives.

Cette caractéristique n'est pas spécifique aux déchets MAVL, mais leur inventaire physique fait clairement apparaître cette propriété qui rend nécessaire l'utilisation d'un matériau fluide de type coulis de ciment pour un meilleur remplissage des vides entre les déchets.

Cependant, ce type de matériau cimentaire est généralement relativement exothermique lors de la prise. De plus, les déchets constituent eux-mêmes une source de chaleur. Le risque de RSI au colis doit en conséquence être prévenu.

Cela nécessite, d'une part, de réaliser une formulation spécifique, mettant en œuvre des matériaux, particulièrement un ciment, adaptés à limiter la température atteinte en phase de prise. D'autre part, cela nécessite de définir un procédé et des conditions de mise en œuvre adaptés pour la fabrication du colis, et un mode d'entreposage permettant de gérer le comportement thermique des colis.

6.3.1 Comportement thermique du colis en phase de blocage des déchets

6.3.1.1 Critères de températures à respecter

En phase de blocage des déchets en panier, mais également en phases de calage du panier dans le colis et de fermeture du colis par coulée d'un bouchon en béton, les procédés de fabrication des matrices cimentaires doivent permettre par conception de garantir une température à cœur dans ces matériaux toujours inférieure à 75°C.

Ce critère de température de 75°C issu d'une recommandation du LCPC selon le niveau de prévention (Ds) (cf. § 6.5.6) s'appuie sur les éléments suivants lorsqu'on l'applique au colis C1PG^{SP} MAVL d'ICEDA :

- L'usage du ciment HTS du Teil (ciment CEM I 52,5 SR5 PM) reconnu pour sa chaleur d'hydratation limitée ;
- Une étude du LRPC de Lille spécifique à l'évaluation des ciments PMES vis-à-vis de la réaction sulfatique interne (Etude de Pascal Fasseu 12/2010) montrant le bon comportement du ciment du Teil ;
- La présence de fumées de silice dans la formulation des matrices cimentaires constituant le colis et en particulier dans le coulis de ciment développé pour le blocage des déchets sur ICEDA, dans des proportions reconnues favorables pour la prévention de la pathologie ;
- Des résultats d'essais en laboratoire selon un programme bâti autour de l'essai de référence mis au point par le LCPC / IFSTTAR pour des bétons, programme qui s'avère en conséquence particulièrement « enveloppe » pour un coulis de ciment. Ces résultats expérimentaux menés sur éprouvettes exposées à un pic de température jusqu'à 85°C et conditionnées selon un mode de conservation représentatif du colis (ie.

échanges hydriques nuls compte tenu de l'enveloppe externe confinante constituée par le conteneur et le bouchon de fermeture) ne démontrent aucun signe de sensibilité à une RSI.

Ce critère de température permet de gérer le risque de RSI dans les matrices cimentaires constituant le colis et en particulier dans le coulis de ciment utilisé pour le blocage des déchets en panier. En effet, au-delà d'un niveau de température dans le matériau cimentaire, la RSI peut potentiellement agir par formation différée de cristaux d'ettringite et se manifester par un gonflement tardif du matériau avec un risque de dégradation in fine de l'enveloppe du colis.

Des essais représentatifs réalisés à l'échelle 1 sur des colis inactifs dotés d'une résistance électrique simulant la puissance thermique des déchets, ainsi que des calculs réalisés à partir d'un modèle validé sur ces essais, ont permis de démontrer, considérant des conditions d'ambiance spécifiées notamment pour la cellule de blocage des déchets, que la température à cœur dans les colis en phase de blocage des déchets puis en phase d'entreposage des colis reste inférieure au critère recommandé par le LCPC / IFSTTAR.

6.3.1.2 Essais à l'échelle 1

Des essais semi-représentatifs du processus de conditionnement des déchets MAVL en colis C1PG^{SP} à ICEDA ont été réalisés fin 2009 à l'échelle 1 [21] mettant en œuvre une canne chauffante parmi des déchets métalliques postiches en acier noir (et non pas en inox) afin de simuler une puissance thermique de 170 W par colis et considérant, selon les essais, une température ambiante de 20 ou 40°C et une température du coulis inférieure à 20°C.

Ces essais ont été réalisés dans des conditions enveloppes mettant en œuvre une faible quantité de déchets (de l'ordre de 10% du volume utile du panier) de manière à accentuer l'effet exothermique d'un volume de coulis de fait plus important.

Les principaux résultats de ces essais sont les suivants :

- Au cours de la phase de blocage des déchets, l'exothermie lors de la prise du coulis est largement prépondérante devant la puissance thermique des déchets.
- La température ambiante lors du blocage des déchets influe significativement sur le niveau du pic thermique dans le coulis. Pour une température du coulis inférieure à 20°C, à 20°C d'ambiance, le critère de 75°C dans le coulis est respecté, la température maximale mesurée à cœur étant de 73°C. Il ne l'est plus à 40°C d'ambiance.
- Le pic thermique est observé en phase de prise du coulis lors de l'opération de blocage des déchets. Il se situe dans la zone de coulis sans déchet, les déchets métalliques favorisant l'évacuation de la chaleur grâce à une meilleure conductivité thermique.

Nota : concernant l'essai à la température ambiante de 40°C dans la cellule de blocage, cette localisation évolue vers un pic à proximité de la canne chauffante sans toutefois que l'écart de température avec le pic dans le coulis seul soit significatif. L'explication est liée à l'inertie thermique des éléments métalliques en présence, le panier, les déchets et la canne étant à une température stabilisée de 40°C avant le démarrage de la coulée d'un coulis à 15°C en moyenne qui malgré une montée en température progressive liée à la prise va perdre une part de chaleur à refroidir les éléments métalliques.

- La canne chauffante, délivrant les 170 W dans le coulis à travers les déchets, était une résistance torique qui localise cette puissance bien plus que lorsque celle-ci est répartie de manière homogène dans un amas de



**Projet ICEDA - Référentiel de conditionnement des déchets MAVL.
Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PGSP**

ING/DP2D/LP1-DS

Référence :

D305615010794

Indice :

C

Page 31/65

déchets métalliques. A la découpe du colis prototype, le coulis n'a néanmoins pas montré de détérioration particulière liée à une concentration de chaleur du fait de la présence de la canne. Aussi, une détérioration du coulis cimentaire localement dans un panier du fait d'un point particulièrement chaud n'est pas envisageable.

Ces essais thermiques, considérant l'acier noir des paniers et des déchets postiches, ont permis d'alimenter le modèle numérique mentionné au paragraphe 6.3.1.3 considérant les valeurs de conductivités thermiques correspondantes de ces éléments. La simulation des essais a fait l'objet d'une comparaison des calculs aux mesures de températures prises au cours des essais (cf. § 6.3.1.3).

Un essai à l'échelle 1 a été reconduit en 2015, mettant en œuvre la fabrication d'un colis dans les conditions limites d'exploitation retenues (cf. § 6.3.1.4) avec 400 kg de déchets inox représentatifs de crayons découpés en tronçons de 10 cm, dans un panier inox équipée d'une canne chauffante délivrant une puissance de 170 W. Le pic de température à cœur du coulis de blocage a été enregistré à 76,7°C pour un résultat de calcul à l'aide du modèle de 72,6°C et un seuil fixé à 75°C. Cet écart de 4°C est imputable :

- à une température du coulis de blocage au cours de l'essai de 12°C au lieu de 10°C maximum, cette dernière valeur ayant été utilisée pour les calculs,
- à l'écart mentionné au pic exothermique (cf. § 6.3.1.3),

Il est rappelé que les conditions expérimentales retenues rendent cet essai fortement défavorable sur le plan de son comportement thermique, en particulier du fait de la faible quantité de déchets.

Un dernier essai a été réalisé en 2016, dans les mêmes conditions, mais mettant en œuvre une quantité de déchets inox avoisinant deux tonnes. Le pic de température à cœur du coulis de blocage a été enregistré à 61°C avec un coulis à 12°C (au lieu de 10°C maximum) pour un seuil fixé à 75°C.

6.3.1.3 Modèle du comportement thermique du colis MAVL ICEDA

Un modèle de comportement thermique du colis C1PG^{SP} MAVL ICEDA a été développé.

Au-delà de la conduction dans les éléments constitutifs du colis et des échanges thermiques avec l'air ambiant, ce modèle intègre, sous la forme d'une réaction globale, la chaleur d'hydratation du coulis lors de la prise par le biais d'une loi d'Arrhenius développée sur la base de mesures de l'exothermie de la prise du coulis en calorimètre adiabatique :

$$\dot{Q}(t) = Q_{\text{hydra}} \cdot A(\xi) \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right)$$

avec		
A	(s ⁻¹)	l'affinité chimique
$\xi = Q(t)/Q_{\text{hydra}}$		l'avancement
E _a	(J)	l'énergie d'activation
R	(J.K ⁻¹)	la constante des gaz parfaits
T	(K)	la température

$Q_{\text{hydra}} = [] \text{ J/m}^3$ et l'avancement ou degré d'hydratation $E_a/R = [] \text{ Kelvin}$.

Les données d'essais relatives à la prise du coulis cimentaire en calorimètre adiabatique permettent de déterminer l'allure de l'affinité chimique en fonction du degré d'hydratation du coulis :



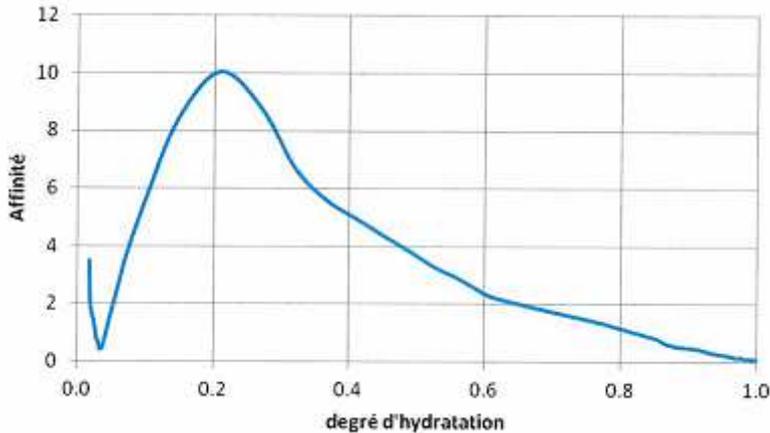
**Projet ICEDA - Référentiel de conditionnement des déchets MAVL.
Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PGSP**

ING/DP2D/LP1-DS

Référence : D305615010794

Indice : C

Page 32/65



Cette courbe est introduite de manière tabulée dans le modèle traduisant la chaleur d'hydratation du coulis cimentaire lors de l'opération de blocage des déchets en panier.

La chaleur dissipée par les déchets eux-mêmes est modélisée en considérant que le volume disposant du mélange de déchets métalliques et de coulis dissipe sa chaleur par le biais d'une conductivité thermique équivalente. Cette conductivité thermique équivalente a été déterminée à partir de la conduction thermique du coulis cimentaire et de celle de l'acier des déchets. Elle est fonction de la quantité de déchets considérée dans le volume de coulis. Son estimation varie autour de [] à [] W/m/K pour la quantité de déchets admissible dans un panier ICEDA.

La cohérence des profils de température calculés dans les conditions des essais à l'échelle 1 de 2009 avec les profils expérimentaux obtenus au cours de ces essais permet de qualifier ce modèle de prédictif. Les résultats de comparaisons calculs / mesures mettent en évidence la très bonne capacité du modèle à représenter le système. En effet, l'écart entre le calcul et la mesure le plus fort constaté au pic thermique en phase de prise du coulis de blocage des déchets en panier est inférieur à 3°C. Plusieurs explications peuvent être évoquées :

- la variabilité de la conductivité thermique du coulis entre un état "en phase de prise" et un état durci,
- un écart de positionnement d'un thermocouple,
- une limite de représentativité du calcul dans le mélange de coulis cimentaire avec les déchets étant donné que le modèle considère l'ensemble {déchets + coulis} un matériau homogène équivalent (ie. en terme de conductivité thermique) dans cette zone tandis que les thermocouples voient du coulis, des postiches de déchets métalliques et peuvent être plus influencés par la présence de l'un ou de l'autre selon le positionnement,
- une précision de mesure des thermocouples de l'ordre du degré.

Afin de tenir compte de cet écart dans l'étude de sensibilité conduite à l'aide du modèle sur la température à cœur dans le coulis de blocage, on cherche à vérifier que malgré le cumul d'hypothèses pénalisantes, la température maximale fournie par le modèle est inférieure à la limite de 75°C évoquée au paragraphe 6.3.1.1 et respecte la valeur de 72°C.

Cette étude de sensibilité, réalisée sur la base d'une conductivité thermique d'acier inox pour les déchets et le panier, apporte les résultats suivants :



**Projet ICEDA - Référentiel de conditionnement des déchets MAVL.
Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PGSP**

ING/DP2D/LP1-DS

Référence :

D305615010794

Indice :

C

Page 33/65

- Le niveau de température dans la zone de coulis seul (ie. zone au dessus des déchets) est plus élevé lorsque le colis contient une faible quantité de déchets,
- En régime établi, la température maximale à cœur dans le colis varie linéairement avec la température de l'air ambiant autour du colis.

Cette étude de sensibilité permet de définir les conditions d'exploitation de mise en œuvre des colis (opération de blocage notamment). Elle permet en particulier de fixer un domaine de températures pour le coulis de blocage à sa mise en œuvre et pour l'air ambiant garantissant une température à cœur du coulis toujours inférieure à 75°C, considérant comme évoqué ci-dessus une cible à 72°C, durant toutes les phases de fabrication du colis. Ce domaine est traduit en conditions industrielles d'exploitation dans la conclusion ci-dessous.

6.3.1.4 Sensibilité de la répartition des déchets dans le panier

Dans la modélisation, le bloc de déchets (déchets inox + coulis cimentaire) est défini à l'aide d'une conductivité thermique équivalente. Dans la mesure où il n'est pas possible de modéliser un arrangement aléatoire de déchets, cette conductivité équivalente a été approchée par la modélisation, considérant différents arrangements de tronçons métalliques de déchets inox dans un volume de coulis cimentaire (crayons horizontaux ou obliques).

La conductivité thermique du coulis de [] W/m/K pilote globalement la conductivité thermique équivalente du bloc de déchets. En arrangement oblique, cette dernière est estimée à [] W/m/K pour des 400 kg de déchets inox (16 W/m/K) découpés en tronçons de 10 cm et placés en fond de panier. Pour illustrer l'influence largement prédominante du coulis sur le comportement thermique du bloc de déchets, cette conductivité équivalente est estimée à [] W/m/K quand on considère 1700 kg des mêmes tronçons inox de crayons dans le panier.

L'impact de l'incertitude pouvant porter sur la valeur de conductivité thermique équivalente sur le résultat des calculs thermiques est donc minime.

6.3.1.5 Cas des déchets contenant du pyrex

Aucun essai à l'échelle 1 n'a été réalisé, mettant en œuvre des déchets postiches représentatifs de crayons de type poisons, contenant une proportion de pyrex qui constitue un matériau plus isolant que l'acier inox. Néanmoins les premières investigations complémentaires menées donnent les résultats suivants :

- les crayons poisons des grappes fixes sont constitués d'un noyau en acier, d'une gaine en pyrex elle-même enveloppée d'une gaine inox. Précisément, le pyrex d'épaisseur [] mm dans les crayons poisons enveloppe une âme d'acier inox de diamètre de [] mm. Il est par ailleurs recouvert d'une gaine en acier inox d'épaisseur de [] mm.
- La conductivité thermique intrinsèque du pyrex est de 1,13 W/m/K. Néanmoins, vis-à-vis du rayonnement, le pyrex est plus ou moins transparent suivant la longueur d'onde. Aussi, il serait envisageable de prendre en compte une certaine transparence du pyrex par l'intermédiaire de l'approximation de Rosseland (ie. évaluation d'une conductivité équivalente du pyrex tenant compte du rayonnement en augmentant sa conductivité thermique intrinsèque). Cependant, nous considérons l'hypothèse conservatrice d'un pyrex totalement opaque de conductivité thermique limitée à [] W/m/K. De cette façon, la situation réelle se situe entre l'hypothèse d'un crayon avec un pyrex opaque et celle d'un crayon en inox dont la conductivité est de [] W/m/K. Cette démarche pénalisante est celle sur laquelle se basent les résultats présentés ci-après.

Considérant,

- un colis « enveloppe » de 400 kg de déchets à 400 TBq équivalent ^{60}Co ,
- une puissance des déchets inox avec ou sans pyrex de 170 W,
- un panier dans une ambiance à 30°C,
- un coulis à 10°C à sa mise en œuvre,

Les résultats suivants, déterminés à l'aide du modèle numérique permettent de comparer, lors de la phase de blocage des déchets en panier (ie. opération pour laquelle le pic de température à cœur dans le coulis est observé), les températures maximales atteintes pour des déchets inox ou inox/pyrex :

Type de déchets	Température maximale observée dans le coulis pur
inox	72.2°C (cf. figure 16, point 7.4.3 de [2])
Inox/pyrex (type crayon poison)	73.4°C

En définitive, considérant un colis « enveloppe », une ambiance en cellule de blocage pénalisante à 30°C, et, par ailleurs le pyrex comme un matériau totalement opaque, l'influence de la présence de pyrex dans les crayons poisons des grappes fixes sur la température maximale à cœur dans les paniers de déchets est de l'ordre du degré. La température calculée reste inférieure à 75°C et est très proche de la cible des 72°C (cf. paragraphe 6.3.1.3), et ce malgré le cumul des hypothèses pénalisantes et autres incertitudes rappelées ci-après :

- L'hypothèse d'un crayon « tout pyrex opaque » sans inox est pénalisante,
- la précision de mesure des thermocouples utilisés dans nos essais est de l'ordre du degré.
- La valeur de 3°C d'écart entre calculs et mesures au pic thermique du coulis en phase de prise lors du blocage correspond à un maximum constaté dans nos comparaisons calculs/mesures. Les moyennes des écarts calculs/mesures et des écarts types données dans [2] et sont du même ordre que l'incertitude sur la mesure.
- Les éléments transmis sur le comportement du coulis vis-à-vis de la RSI au-delà du seuil de 75°C à cœur (cf. § 6.3.1.1) à savoir, dans le cas du coulis cimentaire de blocage des déchets considéré par EDF, que le critère de 75°C recommandé par le LCPC pour l'usage d'un ciment à faible chaleur d'hydratation dispose d'une marge de 10°C compte tenu des résultats d'essais présentés montrant l'absence de formation d'ettringite différée pour une température de 85°C sur éprouvettes conservées sans échange hydrique avec l'extérieur.
- Enfin, les estimations réalisées considèrent une ambiance autour des paniers en phase de blocage de 30°C, au limite du domaine de fonctionnement d'ICEDA pour la cellule de blocage, garantie par une consigne de température de l'air à l'extraction du local qui reste à fixer pendant les essais.

Compte tenu de ces éléments, le seuil de 75°C à respecter vis-à-vis du risque de réaction sulfatique interne à cœur du panier pour des déchets contenant du pyrex nous paraît respecté. Des investigations complémentaires sont en cours pour confirmer définitivement ce point.

6.3.1.6 Conditions industrielles d'exploitation à respecter

Les conditions industrielles d'exploitation à respecter pour garantir une température à cœur du coulis de blocage des déchets inférieure à 75°C sont les suivantes :

- La température du coulis est inférieure à 10°C à sa mise en œuvre dans le panier.
- La température ambiante dans le local de blocage des déchets est inférieure ou égale à 30°C.
- Le temps d'attente de la prise du coulis de blocage des déchets doit être de 48 heures minimum afin de passer le pic exothermique de prise du dit coulis, avant calage et coulage du bouchon.

Ces conditions d'exploitation sont définies sur la base d'un colis « enveloppe » pour lequel la faible quantité de déchets accentue l'exothermie d'un volume de coulis plus important.

6.3.2 Comportement thermique des colis en phase d'entreposage

La ventilation a vocation à évacuer les calories, sans action directe sur l'hygrométrie dans les halls outre l'effet de l'évacuation des calories sur l'hygrométrie elle-même. Elle ne régule pas la thermique des halls.

Les dispositions actives de préservation des colis dans les halls sont les suivantes :

- les colis sont positionnés dans un environnement fermé (hors d'eau, hors d'air) et confinant délimité par le génie civil du hall,
- la zone d'entreposage est dans une aire circonscrite par une barrière métallique qui empêche la chute d'un colis dans une zone hors de portée du pont de manutention,
- les colis sont disposés selon un empilement pyramidal en quinconce sur 3 niveaux stable en cas de séisme.

6.3.2.1 Critères de température à respecter

En phase d'entreposage (cf. fiche réponse à la PA 14, [2]) :

- La température en tout point du coulis sera, quelle que soit la répartition des déchets dans le colis, toujours inférieure à 65°C en fonctionnement normal ;
- La température à cœur du coulis sera toujours inférieure à 75°C en cas de perte de la ventilation du hall d'entreposage.

6.3.2.2 Respect du critère à cœur de 65°C en fonctionnement normal

Limite de température d'air relative au seuil de 65°C à cœur du coulis

Le modèle de comportement thermique décrit précédemment permet d'estimer la température à cœur du colis au-delà de la durée d'exothermie de prise du coulis de blocage des déchets, c'est-à-dire à l'équilibre thermique du colis dans un environnement donné, compte tenu de la puissance thermique portée par les déchets et de la température ambiante.

On définit, de manière pénalisante du point de vue thermique, la notion de « colis enveloppe » par un colis disposant d'une faible quantité de déchets métalliques dont l'activité radiologique est en limite radiologique haute du domaine de fonctionnement d'ICEDA.

**Projet ICEDA - Référentiel de conditionnement des déchets MAVL.
Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PGSP**

ING/DP2D/LP1-DS

Référence :

D305615010794

Indice :

C

Page 36/65

Ainsi, en régime établi, les calculs indiquent que la température maximale d'air autour d'un « colis enveloppe » (cf. fiche réponse à la PA 14, [2]) doit être inférieure ou égale à 52°C pour maintenir le respect d'un critère de température à cœur inférieure à 65°C.

Bilan global d'énergie sur le hall d'entreposage

Dans la suite, l'hypothèse de température de l'air à l'extérieur d'ICEDA retenue pour le fonctionnement normal est une température constante égale à 34°C telle que définie en régime établi « longue durée » dans le référentiel « Grands Chauds » des tranches en exploitation à Bugey.

Un bilan global d'énergie tenant compte de la puissance thermique portée par les colis de déchets et de la dissipation thermique à travers le génie civil du hall permet, à partir des conditions d'air de ventilation (débit, température d'air entrant), d'estimer une température d'air à l'extraction du hall.

L'équation de bilan d'énergie est la suivante :

$W_{\text{empilement colis}} = Q_{\text{air}} C_{p\text{air}} (T_{\text{air extraction}} - T_{\text{air soufflage}}) + W_{\text{dissipation hall}}$	
$W_{\text{empilement colis}}$	Puissance thermique totale portée par l'empilement des colis
$Q_{\text{air}}, C_{p\text{air}}$	Débit d'air de ventilation dans le hall, Chaleur spécifique de l'air
$T_{\text{air extraction}}$	Température de l'air au niveau de l'extraction dans le hall
$T_{\text{air soufflage}}$	Température de l'air de soufflage dans le hall (ie. température ambiante extérieure)
$W_{\text{dissipation hall}}$	Perte thermique par dissipation à travers le génie civil du hall (voiles, dalle et plafond)

La température de l'air à l'extraction du hall est estimée comme suit :

Puissance thermique totale dans le hall telle que fixée en limite dans le domaine de fonctionnement d'ICEDA	T°C d'air	
	soufflage	extraction
<p>30 kW (en phase transitoire dont la fin est soumise à autorisation ASN)</p> <p><u>Nota</u> : ce niveau de puissance est liée au maintien d'une humidité relative dans chaque hall au moins égale à 50% dans l'attente de consolider l'évaluation du comportement mécanique du béton des colis vis-à-vis du risque de fissuration par retrait/dessiccation en ambiante plus sèche (autour de 30 à 35%HR, cf. Pièce 1 § 10.2.2)</p>	34°C	39°C
<p>80 kW (à terme, après autorisation ASN)</p> <p><u>Nota</u> : cette puissance est estimée considérant un critère de puissance thermique par colis de 50 W à réception à CIGEO. Une valeur plus haute retenue in fine par l'Andra dans les spécifications d'acceptation CIGEO pourra réduire la puissance totale par hall plein et favoriser en ce sens le comportement thermique à cœur des colis en phase d'entreposage</p>	34°C	48°C

La température de l'air dans l'empilement des colis prise égale, de manière conservative, à la température d'extraction ainsi estimée demeure inférieure au seuil de 52°C préalablement défini. Par conséquent, la température à cœur des colis estimée à 61°C (cas 80 kW/hall) demeure inférieure au critère de 65°C.

Les conservatismes considérés dans cette approche sont a minima les suivants :

- Homogénéisation des propriétés de l'air dans le hall :

Le dispositif de ventilation MIX-IND (Diffusion linéaire à pulsion) développé par la société SINTRA (Systèmes industriels de traitement de l'air) fait référence dans le domaine de la ventilation des halls de grande capacité. L'expérience de SINTRA, à travers les essais menés dans divers halls à l'échelle 1, atteste de la qualité d'homogénéisation de l'air avec ce type de dispositif.

Ce dispositif est constitué d'une gaine en plafond sur toute la longueur du hall et dont le positionnement est centré sur la largeur du hall. La gaine est dotée d'une ligne de trous (ou buses de direction) orientés verticalement face à l'empilement des colis et positionnés suivant la génératrice inférieure dans le sens de sa longueur.

La vocation de ce type de gaine est d'homogénéiser le volume d'air en présence dans le hall, en induisant un flux d'air à basse vitesse, sans courant d'air. Cette homogénéisation justifie l'absence de point chauds à travers l'empilement des colis. Elle justifie par ailleurs l'approche par modélisation globale telle qu'explicitée ci-après.

Une modélisation aéraulique 3D mettant en œuvre un empilement complet de colis sur 3 niveaux dans le hall a néanmoins permis de confirmer ce bon niveau d'homogénéité de la température de l'air en tout point dans le hall avec un écart maximal inférieur à 5°C entre les températures maximales et minimales calculées. Notons que ce modèle considère un terme source de puissance thermique enveloppe de 80 kW, considérant comme hypothèse pénalisante un hall rempli en 30 ans et une décroissance thermique des colis défavorable, c'est-à-dire considérant à chaque échéance de décroissance le maximum de puissance entre un colis piloté par le Co60 et un colis piloté par un mix Co60/Ag108m.

Ainsi, l'air de soufflage chauffé par l'empilement des colis monte vers le plafond du hall sous l'effet de la convection naturelle. De fait, l'hypothèse selon laquelle la température de l'air dans l'empilement des colis est égale à la température de l'air à l'extraction du hall située en hauteur, constitue une hypothèse conservative.

- La perte thermique par dissipation à travers le génie civil du hall est prise en compte à hauteur de 20% de la puissance totale portée par les colis. Ce résultat est tiré de la modélisation aéraulique 3D évoquée ci-avant, considérant d'une part l'hypothèse d'un hall adiabatique et d'autre part tenant compte des échanges thermiques avec le génie civil du hall.

Dans l'hypothèse d'un hall parfaitement adiabatique, la température d'air à l'extraction est estimée à 52°C, soit égale au seuil permettant de respecter le critère de 65°C à cœur du coulis. Le caractère irréaliste de cette hypothèse démontre, en fonctionnement normal, que la température à cœur d'un colis « enveloppe » et par conséquent de l'ensemble des colis demeure inférieure au critère de 65°C ;

- Les pertes thermiques par conduction des colis avec la dalle du hall ne sont pas prises en compte ;

**Projet ICEDA - Référentiel de conditionnement des déchets MAVL.
Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PGSP**

ING/DP2D/LP1-DS

Référence :

D305615010794

Indice :

C

Page 38/65

- La température de soufflage de 34°C retenue en fonctionnement normal est exploitée considérant un régime établi sur une durée conséquente. Considérer cette valeur sans tenir compte des fluctuations de température jour/nuit constitue un conservatisme.
- La puissance thermique de 80 kW portée par les colis telle que fixée dans le domaine de fonctionnement d'ICEDA est enveloppe.

Conclusion

En fonctionnement normal, considérant une puissance « enveloppe » de 80 kW portée par l'empilement des colis, considérant également le cas d'un colis « enveloppe » (colis disposant d'une faible quantité de déchets métalliques dont l'activité radiologique est en limite radiologique haute du domaine de fonctionnement d'ICEDA), et le scénario pénalisant d'une température de soufflage égale à 34°C sur une longue durée sans fluctuations (i.e. alternance jour/nuit), la température de l'air autour des colis, estimée à 48°C, est inférieure au seuil de 52°C défini pour maintenir une température à cœur des colis, estimée à 61°C, sous le critère de 65°C.

Nota : Une limitation de la puissance thermique par hall à une valeur inférieure, telle que proposée de manière transitoire par EDF au paragraphe 6.8 pour consolider l'évaluation du comportement mécanique du béton des colis vis-à-vis du risque de fissuration par retrait/dessiccation en ambiante plus sèche (autour de 30 à 35%HR, cf. Pièce 1 § 10.2.2), garantit par voie de conséquence le maintien d'une température à cœur des colis sous le critère de 65°C.

6.3.2.3 Respect du critère à cœur de 75°C en cas de perte de la ventilation

Une perte prolongée de ventilation entraîne une augmentation de la température de l'air dans le hall et par conséquent de la température à cœur des colis. Un nouvel équilibre thermique s'établit à la suite d'un régime transitoire fonction des inerties thermiques du génie civil du hall et du béton des colis.

Limite de température d'air relative au seuil de 75°C à cœur

Le modèle de comportement thermique décrit au § 6.3.1.3 permet de déterminer, en régime établi, une température maximale d'air autour d'un colis « enveloppe » égale à 62°C pour maintenir un critère à cœur inférieur à 75°C.

Température de l'air dans le hall en régime établi, en l'absence de ventilation

Dans la suite, l'hypothèse de température de l'air à l'extérieur d'ICEDA retenue en cas de perte prolongée de la ventilation est une température égale à 31°C, relative à un maxima projeté à échéance de la fin du siècle des moyennes de températures observées sur 14 jours au niveau du CNPE de Bugey.

L'équilibre thermique du hall en l'absence de ventilation est atteint lorsque la puissance portée par l'empilement des colis est entièrement dissipée à travers le génie civil du hall. Un nouveau bilan global d'énergie permet alors d'estimer la température moyenne de l'air dans le hall : considérant le cas enveloppe d'un hall à 80 kW, sur la base d'une température d'air extérieur égale à 31°C, la température de l'air dans le hall à l'équilibre thermique après une perte prolongée de la ventilation est estimée à 51°C. Elle implique alors une température estimée à cœur d'un « colis enveloppe » à 64°C.

Si l'on considère une température d'air extérieur égale à 34°C, telle que définie en régime établi « longue durée » dans le référentiel « Grands Chauds » des tranches en exploitation à Bugey, ventilation à l'arrêt, la température moyenne de l'air dans le hall est estimée à 54°C et la température à cœur d'un colis enveloppe à 67°C soit inférieure au critère de 75°C.

Cette approche globale intègre plusieurs conservatismes, en particulier l'hypothèse selon laquelle la température de l'air dans l'empilement des colis est égale à la température moyenne de l'air dans le hall, également l'absence de pertes thermiques par conduction des colis avec la dalle du hall.

Conclusion

Considérant le cas enveloppe d'un hall à 80 kW et une température externe de 31°C, relative à un maxima projeté à échéance de la fin du siècle des moyennes de températures observées sur 14 jours au niveau du CNPE de Bugey, la température de l'air dans le hall vers un nouvel équilibre thermique suite à une perte prolongée de la ventilation, est estimée à 51°C, démontrant à cet équilibre que la température à cœur d'un colis « enveloppe » estimée à 64°C respecte le critère de 65°C en fonctionnement normal recommandé pour maîtriser le risque de réaction sulfatique interne et a fortiori le critère de 75°C en cas de perte de la ventilation.

Nota : Une limitation de la puissance thermique par hall à une valeur inférieure, telle que proposée de manière transitoire par EDF au paragraphe 6.8 pour consolider l'évaluation du comportement mécanique du béton des colis vis-à-vis du risque de fissuration par retrait/dessiccation en ambiante plus sèche (autour de 30 à 35%HR, cf. Pièce 1 § 10.2.2), garantit par voie de conséquence le maintien d'une température à cœur des colis sous le critère de 75°C.

6.3.2.4 Suivi de la température de l'air d'extraction des halls

Un suivi par instrumentation de la température de l'air dans l'empilement de colis n'est pas faisable sur le plan industriel à ICEDA du fait notamment d'une ambiance irradiante, de difficulté de maintenabilité, de gêne à la manutention des colis. Une telle solution n'a donc pas été retenue par EDF car en impasse technologique.

Néanmoins, EDF dispose d'une étude d'aérodynamique en 3D dans le hall et à travers l'empilement de colis justifiant que la température de l'air à l'extraction de chaque hall est représentative de la température de l'air dans l'empilement (cf. § 6.3.2.2).

Aussi, EDF propose de suivre la température de l'air à l'extraction de chaque hall et de fixer un critère de température de l'air à l'extraction à ne pas dépasser. Les modalités de suivi de cette température ainsi que le critère à respecter sont en cours de définition sur la base de la mesure de cette température dans la gaine d'extraction du hall et tenant compte de l'inertie thermique des colis et du génie civil.

En effet, compte tenu du renouvellement de l'air dans le hall toutes les heures, il n'est pas pertinent de contrôler la mesure instantanée de température d'air dans le hall qui pourrait dépasser le critère à fixer sans impact sur les colis compte tenu de leur inertie thermique.

6.4 RADIOLYSE EN SITUATION D'ENTREPOSAGE SUR ICEDA

La radiolyse des colis MAVL en phase d'entreposage sur ICEDA a fait l'objet d'une fiche Position & Action (cf. PA n°15 [3]).

La présente démonstration se positionne à la limite haute du domaine de fonctionnement d'ICEDA c'est-à-dire à une activité radiologique par colis de 400 TBq pour un groupe de radionucléides dits β/γ forts. Cette activité radiologique constitue la source d'une irradiation des déchets sur l'eau porale présente dans la matrice cimentaire de blocage des déchets, dans le béton constituant l'enveloppe confinante externe du colis et en conséquence la source d'une production d'hydrogène de radiolyse.

**Projet ICEDA - Référentiel de conditionnement des déchets MAVL.
Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PGSP**

ING/DP2D/LP1-DS

Référence :

D305615010794

Indice :

C

Page 40/65

Cette production nécessite d'évaluer les quantités de gaz relâchées, en particulier en situation de stockage. Elle peut conduire à des surpressions localisées dans le colis et se traduire par des contraintes mécaniques.

Il convient donc d'évaluer la capacité du colis C1PGSP MAVL à évacuer l'hydrogène de radiolyse en phase d'entreposage à ICEDA, mais aussi à réception, puis en situation de stockage à CIGEO, et à assurer son intégrité mécanique vis-à-vis du phénomène de radiolyse. Cette intégrité mécanique fait en complément l'objet d'une analyse du point de vue du retrait par dessiccation du béton du colis en phase d'entreposage à ICEDA sur plusieurs décennies puis en situation de stockage à CIGEO.

Considérant une démarche conservatrice vis-à-vis de la radiolyse par le choix de configurations enveloppes et pénalisantes de colis de déchets, l'étude propose une estimation du débit de dose dans le bloc de déchets et le béton enveloppe du colis afin d'évaluer une production d'hydrogène elle-même conservatrice durant la vie du colis. Le terme source de production d'hydrogène traduit en contrainte mécanique permet d'évaluer la tenue mécanique des colis sous l'effet des gaz de radiolyse. Enfin, l'application des lois de transport associées aux propriétés des matrices cimentaires constitutives du colis démontre la capacité de celui-ci à évacuer les gaz de radiolyse.

L'étude n'intègre pas l'effet de la radiolyse des adjuvants dans les matrices cimentaires constitutives du colis bien que des expérimentations soient en cours depuis 2010 au CEA sur le comportement sous irradiation des superplastifiants de nouvelle génération utilisés dans les matrices cimentaires (cf. projets SUPERRAD 1 et 2 cofinancés par EDF). Ces travaux scientifiques n'ont en effet à ce stade pas abouti à leur intégration dans les modèles d'estimation de la production d'hydrogène de radiolyse dans les colis de déchets radioactifs.

Seule la production de dihydrogène par radiolyse a été évaluée à ce jour. La production d'autres gaz, en particulier l'oxygène, n'a pas été considérée car elle est minoritaire devant celle de H₂. L'expérience RETIF (Radiolyse de l'Eau en Température sous l'Influence du Fer) a été menée par le CEA entre 2008 et 2010, considérant une configuration d'essais simplifiée et volontairement non représentative d'un colis de déchets particulier. Cette expérience a mis en évidence une pression partielle en H₂ estimée à 90% de la pression totale, démontrant la prédominance de l'hydrogène produit devant les autres gaz.

La consommation d'eau par radiolyse est estimée à quelques kg par colis sur 150 ans. En comparaison, la consommation d'eau du coulis par dessiccation est estimée à environ 25 kg sur 50 ans et environ 60 kg sur 150 ans. Aussi, EDF a estimé que la prise en compte de la consommation d'eau par radiolyse dans les estimations du comportement du colis vis-à-vis de la dessiccation était d'un second ordre.

Enfin, Il est précisé sur la base des résultats de la bibliographie disponible et de l'avis d'expert du CEA (P. BOUNIOL) que les radio-isotopes β/γ faibles ainsi que le tritium et le carbone 14 ne disposent pas d'énergies suffisamment élevées pour casser la molécule d'eau et induire ainsi une production d'hydrogène. C'est la raison pour laquelle il est considéré dans les études de radiolyse une activité radiologique de 400 TBq relative à l'activité maximale autorisée dans le domaine de fonctionnement d'ICEDA uniquement portée par les radio-isotopes β/γ forts.

Nota : les paragraphes suivants ne traitent pas de la production d'hydrogène liée à la corrosion métallique des déchets. Ce sujet est traité dans le chapitre 7.

6.4.1 Configurations enveloppes et pénalisantes de colis de déchets

6.4.1.1 Les déchets représentatifs

Les déchets activés d'exploitation des tranches REP en fonctionnement, en particulier les crayons des grappes de commandes, constituent les déchets représentatifs « enveloppe » de cette étude consacrée à la radiolyse. Ces crayons cylindriques, de diamètre 10 mm environ, seront industriellement découpés en tronçons de l'ordre de 10 cm sur ICEDA. Ce choix de déchets pour l'étude permet comparativement à des déchets activés plus massifs d'augmenter la surface spécifique des déchets au contact du coulis de blocage et par conséquent d'augmenter leur effet en matière de radiolyse.

6.4.1.2 Activité radiologique et masse de déchets par colis

Bien que l'optimisation du remplissage des colis soit un objectif majeur pour économiser la ressource du stockage profond, l'étude considère, de manière pénalisante vis-à-vis du phénomène de radiolyse, deux configurations de colis « enveloppe », en particulier deux masses de déchets par colis permettant de couvrir de manière pénalisante une période à courte terme puis une période à plus long terme selon les radionucléides β/γ forts associés. Ces configurations sont les suivantes :

- Sur un court terme, un colis disposant d'une faible quantité de déchets métalliques de crayons de grappes de commande (400 kg) dont l'activité radiologique est à la limite haute du domaine de fonctionnement d'ICEDA, soit 400 TBq/colis en émetteurs β/γ forts, en présence de ^{60}Co uniquement ou bien d'un mix ^{60}Co / $^{108\text{m}}\text{Ag}$ (cf. ratio² ^{60}Co / $^{108\text{m}}\text{Ag}$ de [], cf. [3]). Cette quantité faible de déchets accroît le volume de coulis cimentaire de blocage et donc d'eau libre en présence,
- A plus long terme, un colis au remplissage « réaliste », disposant de 1990 kg de déchets métalliques de crayons absorbants AIC de grappes de commande du palier 900 MW (cf. Pièce 1 - § 5.1.4 - Hypothèses structurantes du programme de qualification des colis), dont l'activité radiologique à 400 TBq en émetteurs β/γ forts est également en limite haute du domaine de fonctionnement d'ICEDA, avec mix ^{60}Co et $^{108\text{m}}\text{Ag}$ tel que défini précédemment pour cette masse (cf. ratio ^{60}Co / $^{108\text{m}}\text{Ag}$ de [], cf. [3]). Dans un tel cas, la présence en masse plus forte d' $^{108\text{m}}\text{Ag}$ à vie longue maintient un niveau d'activité radiologique plus important dans le temps et occasionne une production d'hydrogène plus soutenue sur le long terme (comparé à un colis à faible quantité de déchets avec mix ^{60}Co et $^{108\text{m}}\text{Ag}$ qui en conséquence détient moins d' $^{108\text{m}}\text{Ag}$).

6.4.1.3 Démarche d'étude

La démarche d'étude se décompose en trois étapes :

- évaluation du débit de dose dans les colis à partir de la définition précédente de colis pénalisants vis-à-vis du phénomène de radiolyse,
- évaluation de la production d'hydrogène de radiolyse à partir des résultats de débit de dose ;
- évaluation de l'impact des gaz de radiolyse mais également de la dessiccation des matériaux cimentaires sur le comportement mécanique du colis, analyse de la capacité du colis à évacuer ces gaz de radiolyse.

Cette démarche ne suit pas un processus itératif : les calculs de débit de dose sur le coulis cimentaire ou le béton enveloppe sont découplés de l'estimation du débit d'hydrogène de radiolyse. Aussi, les résultats d'évaluation du

² Ratio ^{60}Co / $^{108\text{m}}\text{Ag}$ d'activités radiologiques à réception des déchets sur ICEDA déterminé à partir de l'inventaire radiologique des déchets présentant la proportion la plus forte d'activité liée à l' $^{108\text{m}}\text{Ag}$. Ces déchets correspondent aux crayons absorbants AIC des grappes mobiles des tranches REP 900 MWe. La valeur de ce ratio dépend de la masse de déchets par colis.

débit de dose sont appliqués de manière homogène sur l'ensemble du volume des matrices cimentaires sans considérer d'effet de radioprotection (ie. écrantage) dans leur épaisseur. Cette approche participe au caractère conservatif de la démarche d'étude.

6.4.1.4 Prise en compte de l'effet de la température

Considérant chacune des trois étapes décrites dans la démarche d'étude :

- Evaluation du débit de dose dans le colis :

L'effet de la température à cœur du colis dans l'évaluation du débit de dose n'est pas pris en compte car l'impact est jugé négligeable compte tenu du niveau des températures considérées (calculs réalisés à 25°C versus température à cœur de l'ordre de 65°C au maximum).

- Evaluation de la production d'hydrogène :

Concernant le modèle de radiolyse (DO-RE-MI du CEA), les données sur les rendements primaires à pH donné et les constantes cinétiques en fonction de la température ne sont pas connues à ce jour. Aussi, l'effet de la température à cœur du colis sur l'évaluation de la pression d'hydrogène n'a pas été pris en compte.

- Evaluation de la tenue mécanique du colis sous l'effet de la radiolyse et de la dessiccation (prise en compte de l'évolution de la saturation en eau du colis dans le temps) :

La modélisation Thermo-Hydro-Mécanique (THM) du colis C1PG MAVL ICEDA réalisée avec Code_Aster tient compte des conditions de température à cœur et autour du colis. Ceci étant, une étude de sensibilité réalisée à l'aide de cette modélisation démontre l'absence d'impact significatif de la température sur le débit d'hydrogène et évalue des contraintes mécaniques sur le béton de l'enveloppe externe du colis proches des valeurs calculées en conditions standard. Concernant l'effet de la température sur la dilatation de l'eau dans les pores des matrices cimentaires constitutives du colis, la modélisation tient compte de la dilatation de l'eau ainsi que de la pression de vapeur saturante et de leur rôle sur les contraintes. Néanmoins, les conditions aux limites qui imposent une température fixe dans tout le colis sur la durée de simulation annulent ce mécanisme (ie. pas de variation de température). En revanche, dans le béton qui constitue l'enveloppe externe du colis (ie. conteneur et bouchon), ces mécanismes sont bien effectifs.

6.4.1.5 Perméabilité à l'eau du béton enveloppe du colis (conteneur + bouchon)

La perméabilité à l'eau du béton constitue un paramètre majeur de l'étude du comportement des colis vis-à-vis du phénomène de radiolyse.

La valeur de perméabilité intrinsèque à l'eau du béton retenue dans notre étude (cf. [3]) est de $3.0 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ contre une valeur de $7.0 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ utilisée jusqu'alors. Cette valeur de $3.0 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ est issue de la bibliographie. On peut citer à titre d'exemple la thèse de N.Reviron [2010 « Etude du fluage des bétons en traction. Application aux enceintes de confinement des centrales nucléaires à eau sous pression »] dans laquelle l'auteur identifie, pour des bétons hautes performances comparables, des valeurs de perméabilité intrinsèque à l'eau de l'ordre de $1.0 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$, lorsque les conditions aux limites en surface ne tiennent pas compte de la partie convective, ce qui est le cas dans nos modélisations.

Le choix de la valeur de $3.0 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ constitue donc un bon ordre de grandeur étant donné que le béton du colis C1PG^{SP} connaît de meilleures performances que celles du béton considéré dans cette thèse. A titre d'exemple, la porosité du béton de la thèse est de l'ordre de 14% alors que celle de notre béton est inférieure à 10%.

Ceci étant, un programme expérimental est engagé par EDF visant à déterminer différentes caractéristiques du béton du colis C1PG^{SP} dont, directement (par mesure) ou indirectement (par recalage à partir d'essais de séchage), la perméabilité à l'eau du béton. Les résultats permettront de conforter la valeur de 3.0^{E-22} m² utilisée à ce stade dans les études, voire de mettre à jour ces études à partir des valeurs expérimentales obtenues.

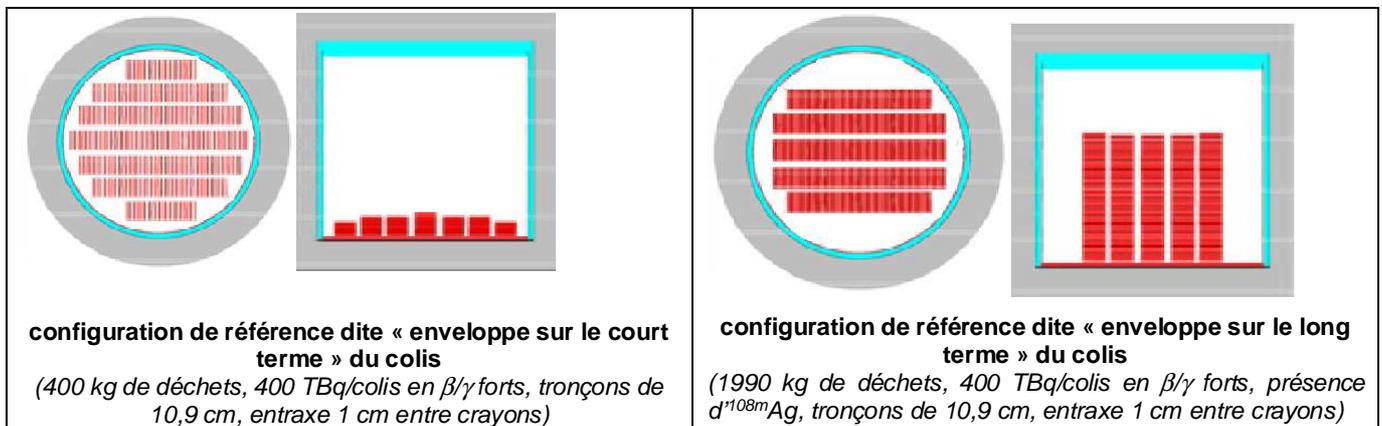
6.4.2 Evaluation du débit de dose dans les colis

Le code TRIPOLI4 associé à la bibliothèque GALILEE-V0-2.1 du CEA est utilisé pour estimer les débits de dose dans le coulis cimentaire bloquant les déchets et dans le béton constituant l'enveloppe externe du colis C1PG^{SP} MAVL ICEDA.

Une étude de sensibilité analyse l'influence des hypothèses d'arrangement des déchets dans le colis afin de pallier au positionnement aléatoire peu prédictible de crayons disposés en vrac dans un panier.

La modélisation choisie représente les morceaux de crayons dans un réseau carré régulier considérant un pas (ie. entraxe) conservatif entre les déchets visant à limiter l'auto-(radio)protection des déchets vis-à-vis du coulis par rapport à une situation réelle de déchets au contact les uns des autres. L'étude de sensibilité estime l'influence de la masse de déchets dans le colis, de la longueur des tronçons de crayons et des radioéléments β/γ forts en présence (⁶⁰Co ou mix ⁶⁰Co/^{108m}Ag).

Les deux configurations « enveloppes » suivantes illustrent le positionnement des tronçons de crayons cylindriques de 10 mm de diamètre, disposés horizontalement et en ligne dans un panier suivant un entraxe de 1 cm entre chaque tronçon de longueur de l'ordre de 10 cm. Ces configurations correspondent à des cas réalistes pénalisants, réalistes dans la limite où en réalité les crayons seront en contact les uns avec les autres.



Comparé à un réseau réel aléatoire de disposition des déchets au contact les uns des autres, le réseau théorique d'agencement des déchets sans contact entre eux considéré dans l'étude accentue la dosimétrie déposée dans le coulis de blocage. Cette méthodologie fournit en conséquence des valeurs de débit de dose majorées participant au conservatisme de la démarche.

Les résultats obtenus démontrent un débit de dose, et donc un phénomène de radiolyse, prépondérants dans le coulis de blocage des déchets. L'évaluation du débit de dose dans le béton du conteneur est néanmoins prise en compte. La composante vie longue de ^{108m}Ag devant celle du ⁶⁰Co fixe le caractère conservatif de l'étude sur le long terme.

En conséquence, dans le but d'estimer la production d'hydrogène de radiolyse de manière conservative, la démonstration retient le cas d'un colis de déchets avec mix ⁶⁰Co/^{108m}Ag. Les débits de dose déposés dans le

**Projet ICEDA - Référentiel de conditionnement des déchets MAVL.
Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PGSP**

ING/DP2D/LP1-DS

Référence : D305615010794

Indice : C

Page 44/65

coulis et le béton du colis (conteneur + bouchon) ont été calculés en répartissant l'activité de 400 TBq entre ces deux isotopes les plus irradiants. Cette condition maintient le débit de dose dans le coulis de blocage des déchets sur une durée plus grande. Les résultats de l'évaluation du débit de dose dans le coulis cimentaire, le béton du conteneur et du bouchon sont les suivants :

Masse déchets	Pas entre tronçons	Longueur des tronçons	Rapport $^{60}\text{Co}/^{108\text{m}}\text{Ag}$ à to pour 400 TBq / colis	Débit de dose à to dû au					
				Coulis cimentaire		Conteneur		Bouchon	
				^{60}Co [Gy/s]	$^{108\text{m}}\text{Ag}$ [Gy/s]	^{60}Co [Gy/s]	$^{108\text{m}}\text{Ag}$ [Gy/s]	^{60}Co [Gy/s]	$^{108\text{m}}\text{Ag}$ [Gy/s]
400 kg CA GN 900MW	1 cm	10,9 cm	[]	$1,850 \cdot 10^{-2}$	$3,080 \cdot 10^{-3}$	$8,281 \cdot 10^{-3}$	$9,191 \cdot 10^{-4}$	$4,701 \cdot 10^{-6}$	$1,052 \cdot 10^{-7}$
400 kg CA GN 900MW	2 cm	10,9 cm		$4,636 \cdot 10^{-2}$	$8,920 \cdot 10^{-3}$	$4,810 \cdot 10^{-3}$	$5,482 \cdot 10^{-4}$	$4,764 \cdot 10^{-5}$	$1,589 \cdot 10^{-6}$
400 kg CI GG 900MW	2 cm	54,4 cm		$4,532 \cdot 10^{-2}$	$8,543 \cdot 10^{-3}$	$3,810 \cdot 10^{-3}$	$4,277 \cdot 10^{-4}$	$9,035 \cdot 10^{-5}$	$3,743 \cdot 10^{-6}$
400 kg CA GN 900MW	2 cm	54,4 cm		$5,563 \cdot 10^{-2}$		$4,682 \cdot 10^{-3}$		$1,118 \cdot 10^{-4}$	
1990 kg CA GN 900MW	1 cm	10,9 cm		$1,241 \cdot 10^{-2}$	$5,747 \cdot 10^{-3}$	$1,085 \cdot 10^{-3}$	$3,148 \cdot 10^{-4}$	$1,068 \cdot 10^{-4}$	$1,753 \cdot 10^{-5}$

Les valeurs de débit de dose transmises concernant le conteneur sont les valeurs maximales estimées dans la partie constituant le fond du conteneur.

6.4.3 Evaluation de la production d'hydrogène de radiolyse

L'évaluation de la production d'hydrogène dans les colis MAVL ICEDA repose sur une démarche numérique s'appuyant sur un modèle de radiolyse en milieu poreux établi par le CEA à partir :

- de l'état des connaissances réalisé en 2004 concernant la radiolyse dans les matrices cimentaires ;
- d'une expérience dite ERMITE (Expérience de Radiolyse en Mini-conteneurs Irradiés sur un Temps Etendu) menée en 2006 par le CEA sur des colis représentatifs à échelle réduite ;
- d'une expérience dite RETIF (Radiolyse de l'Eau en Température sous l'Influence du Fer) menée par le CEA entre 2008 et 2010, considérant une configuration d'essais simplifiée et volontairement non représentative d'un colis de déchets particulier.

Les calculs de production d'hydrogène par radiolyse sont réalisés à l'aide du code CHEMSIMUL développé par l'Université de RisØ au Danemark et à l'aide du modèle DO-RE-MI (Description Opérationnelle de la Radiolyse de L'Eau dans les Matériaux Irradiés) développé par le CEA (P. BOUNIOL). Un chaînage des calculs de radiolyse avec une modélisation thermo-hydro-mécanique (THM) du colis développée en 2D axisymétrique avec Code_Aster permet de tenir compte par ailleurs d'une cinétique de séchage des colis au fil du temps. Cette modélisation suit l'approche des milieux poreux (Biot) en tenant compte des lois classiques de transport (Darcy et Fick pour la perméation et la diffusion) du liquide et du gaz dans les matériaux cimentaires et de la loi de Fourier pour la diffusion de la chaleur. Tous ces phénomènes physiques sont reliés par des couplages forts. La modélisation permet de réaliser un calcul mécanique en température dans une configuration non saturée prenant en compte la production d'hydrogène produit par radiolyse et tenant compte de l'évolution dans le temps du comportement du colis dans son environnement.

**Projet ICEDA - Référentiel de conditionnement des déchets MAVL.
Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PGSP**

ING/DP2D/LP1-DS

Référence :

D305615010794

Indice :

C

Page 45/65

Différentes hypothèses rendent les estimations de la production d'hydrogène de radiolyse et de l'impact mécanique de cette production conservatifs :

- Le modèle d'estimation du débit de dose étant découplé du modèle évaluant la production d'hydrogène, les valeurs maximales de débit de dose calculé à l'aide du code TRIPOLI4 sont appliquées de manière homogène à tout le volume de coulis du bloc de déchets, sans effet de radioprotection (ie. auto-écranage) dans l'épaisseur des matériaux cimentaires (coulis et béton). Autrement dit, tout le volume de coulis ou de béton voit le même débit de dose ce qui ne peut être le cas en réalité ;
- Une activité radiologique en limite haute du domaine de fonctionnement défini pour ICEDA, soit 400 TBq en émetteurs β/γ forts, appliqués à des crayons de grappes de commande contenant un mix $^{60}\text{Co}/^{108\text{m}}\text{Ag}$ pénalisant dans la durée compte tenu de la période radiologique de $^{108\text{m}}\text{Ag}$. L'attribution des 400 TBq aux deux radionucléides mentionnés est conservative puisque d'autres radioéléments considérés β/γ forts, bien qu'énergétiquement avec des ordres de grandeurs inférieurs, composent les déchets (cf. § Pièce 1, § 5.1.2).
- Comparativement à des déchets activés massifs, considérer des crayons de grappes de commande découpés en tronçons permet d'augmenter la surface spécifique des déchets au contact du coulis cimentaire de blocage et en conséquence d'augmenter leur effet radiolytique ;
- Le cumul des hypothèses précédentes à celle d'une masse faible, peu réaliste³, de déchets dans un colis concentre l'activité radiologique dans un volume de coulis de blocage plus important et en conséquence accentue la production d'hydrogène de radiolyse sur une période à court terme.
- De même, le cumul des hypothèses précédentes à celle d'une masse plus élevée et plus réaliste de déchets dans un colis, maintient l'activité radiologique de $^{108\text{m}}\text{Ag}$ plus présent en masse que dans le cas précédent, et en conséquence maintient la production d'hydrogène de radiolyse sur une période à plus long terme.
- L'étude considère les conditions ambiantes à la limite haute du domaine de fonctionnement normal d'ICEDA, soit 61°C dans le coulis et 48°C dans le hall d'entreposage (valeur relative à une température externe constante de 34°C selon le référentiel « grand chaud » du site du Bugey et considérant une puissance thermique de 80 kW/hall plein), sans variation saisonnière ni atténuation sur la durée. L'hygrométrie retenue dans le hall est calculée à partir de cette température et de la valeur d'hygrométrie extérieure la plus basse des moyennes mensuelles saisonnières sur une année (observée sur le site du Bugey sur 10 ans), là aussi sans variation saisonnière. Ces conditions impliquent un environnement sec dans le hall qui conduit à un taux d'hygrométrie très faible : une hypothèse d'humidité relative (HR) de 30% est considérée pour l'étude. Cette hypothèse est pénalisante dans le cadre d'une approche par la mécanique des milieux poreux car elle conduit à imposer des pressions capillaires très élevées en suivant la loi de Kelvin. Elle est pénalisante au sens où ce faible niveau d'HR ne sera en réalité pas atteint instantanément, tant le remplissage des halls et son chargement thermique nécessitera de nombreuses années. Au-delà d'être pénalisante, elle est, à ce stade de développement des modélisations, en dehors du domaine de validité⁴ des modèles THM qui est limité à ce jour à une humidité relative de l'air supérieure à 50%. C'est la raison pour laquelle l'étude évalue par ailleurs le

³ On rappelle qu'un remplissage maximisé de chaque colis par la quantité de déchets la plus grande doit permettre d'économiser la ressource du futur centre de stockage.

⁴ Compte tenu du domaine de validité des modélisations à ce stade (ie. $\text{HR} \geq 50\%$), la capacité thermique des halls d'entreposage à ICEDA sera limitée pour conserver une HR de 50% minimum. Des études sont en cours pour accroître ce domaine de validité jusqu'à 30%HR.



**Projet ICEDA - Référentiel de conditionnement des déchets MAVL.
Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PGSP**

ING/DP2D/LP1-DS

Référence : D305615010794

Indice : C

Page 46/65

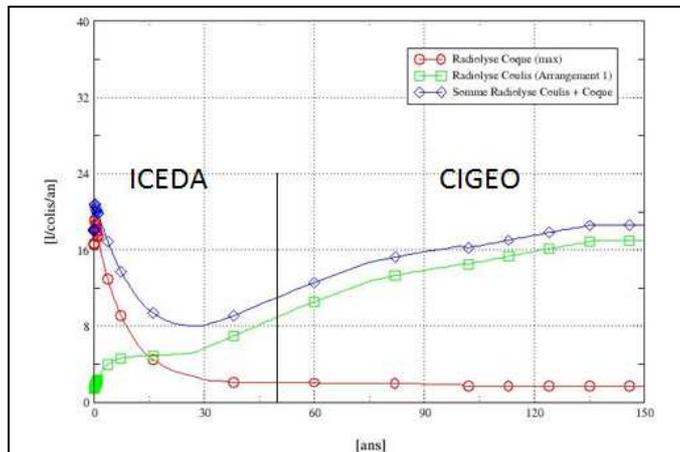
comportement du colis vis-à-vis de la radiolyse sur la base d'une hygrométrie de 50%. Cette dernière correspond à la limite de puissance thermique par hall proposée de manière transitoire au paragraphe 6.8.

- L'étude considère de manière conservatrice que le coulis de blocage et le béton de la coque et du bouchon ont un comportement élastique linéaire. Cette hypothèse est pénalisante car elle ne rend pas compte de la relaxation des contraintes induite par le fluage des matériaux.
- Toutes les interfaces entre les matériaux sont rigides. Cette approche rend la modélisation conservatrice.

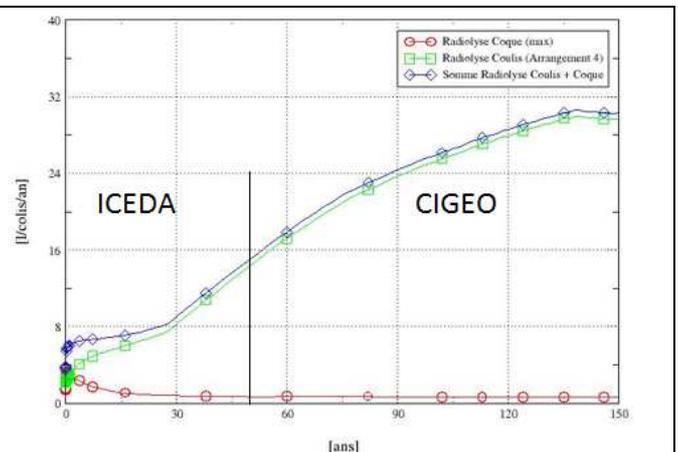
Malgré ces conservatismes, les incertitudes liées aux modèles utilisés bien que faisant référence sur le plan scientifique conduiront EDF à procéder à des comparatifs calculs/mesures lorsque les premiers colis représentatifs pourront être instrumentés en amont des contrôles demandés par l'Andra avant expédition des colis sur CIGEO.

La prise en compte de l'évolution dans le temps du comportement du colis C1PG^{SP} MAVL et, plus particulièrement, de l'influence du séchage des matériaux cimentaires constitutifs du colis permet d'estimer la quantité d'hydrogène produit en fonction du temps.

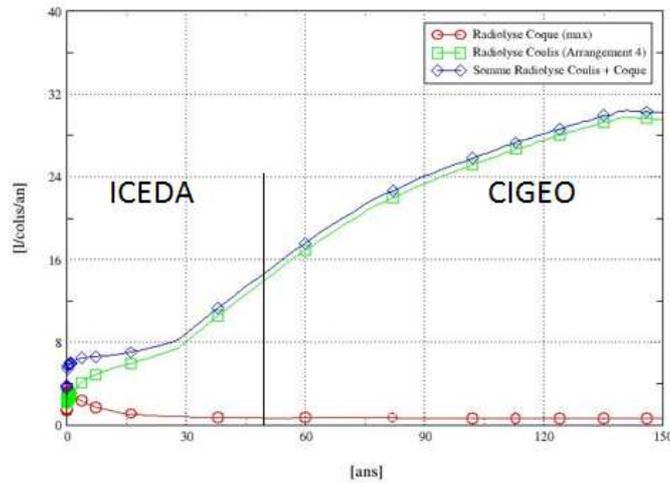
Considérant les configurations de colis « enveloppe » présentées ci-avant, en particulier la présence d'un mix $^{60}\text{Co}/^{108}\text{mAg}$, on constate, durant la phase d'entreposage à ICEDA que le débit d'hydrogène est toujours inférieur à 20 litres/an/colis (cf. figures ci-après) et donc bien inférieur au seuil de 40 litres/an/colis retenu à ce stade par l'Andra dans les spécifications préliminaires d'acceptation des colis à CIGEO. On constate également, dans ces conditions très pénalisantes, que le pic de production de gaz atteint en phase d'exploitation réversible du stockage à CIGEO est de 30 litres/an/colis et qu'en conséquence, du fait de la radiolyse, le seuil de 40 litres/an/colis ne pourra jamais être atteint (cf. figures ci-après). A noter sur les figures suivantes, l'apport faible de la production d'hydrogène dans le béton comparé à celui dans le coulis de blocage des déchets.



Débit d'hydrogène annuel produit par colis pour le colis de référence « enveloppe sur le court terme »
(400 kg de déchets mix $^{60}\text{Co}/^{108}\text{mAg}$, HR hall 30%)



Débit d'hydrogène annuel produit par colis pour le colis de référence « enveloppe sur le long terme »
(1990 kg de déchets mix $^{60}\text{Co}/^{108}\text{mAg}$, HR hall 30%)



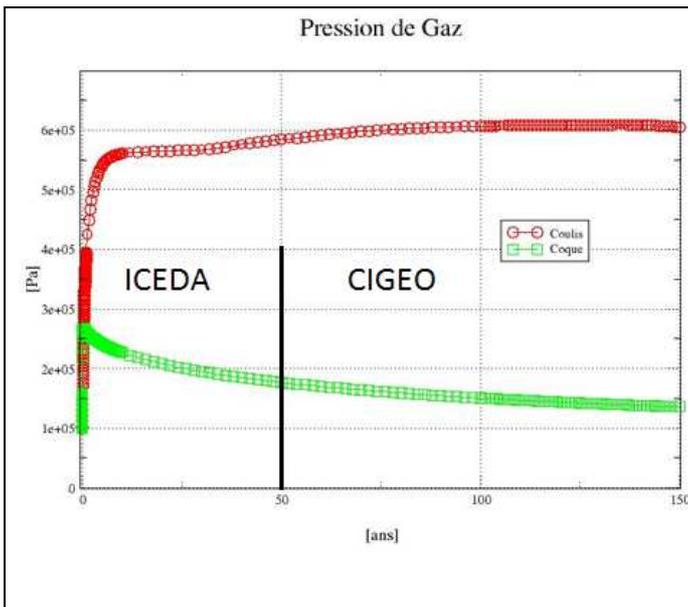
Débit d'hydrogène annuel produit par colis pour le colis de référence « enveloppe sur le long terme »
(1990 kg de déchets mix $^{60}\text{Co}/^{108m}\text{Ag}$, HR hall 50%)

A noter qu'en situation de stockage, la décroissance radiologique du ^{60}Co tend à diminuer la production d'hydrogène par colis qui s'annule pour les colis avec seule présence de ^{60}Co .

6.4.4 Capacité du colis C1PG^{SP} MAVL ICEDA à évacuer l'hydrogène de radiolyse

Les valeurs de pression en hydrogène sont les plus fortes dans le coulis de blocage des déchets. Elles sont comparativement plus faibles dans l'enveloppe externe du colis (ie. béton du conteneur et du bouchon).

Considérant le résultat de calcul le plus pénalisant vis-à-vis de la pression de gaz dans le colis, à savoir celui obtenu pour le colis de référence « enveloppe sur le long terme » à 30%HR dans le hall d'entreposage d'ICEDA, les pressions de gaz sont uniformes et stables dans le temps, autour de 6 bars à l'intérieur du coulis (cf. figure ci-après).



Les pressions de gaz dans la coque sont plus faibles et diminuent au fil du temps du fait des échanges entre le colis et son environnement, favorisés par la ventilation autour du colis. L'étude y estime une pression d'hydrogène maximale inférieure à 3 bars.

Tenant compte du domaine de validité actuel de la modélisation concernant l'humidité relative, un second résultat de calcul est proposé à 50%HR : à ce niveau d'humidité relative dans le hall d'entreposage d'ICEDA, le niveau de pression de gaz dans le coulis évolue selon le même profil que celui donné en figure ci-contre. Ce profil, également stable, atteint une valeur asymptotique de l'ordre de 3.6 bars.

Evolution de la pression d'hydrogène maximale dans le coulis de blocage des déchets et dans la coque pour le colis de référence « enveloppe sur le long terme » (1990 kg de déchets mix $^{60}\text{Co}/^{108m}\text{Ag}$, HR hall 30%).

L'absence de surpression significative de gaz ou d'accumulation tel qu'illustré par l'asymptote sur la figure précédente démontre la capacité du colis à évacuer les gaz produits.

6.4.5 Résistance mécanique du colis C1PG^{SP} MAVL ICEDA sous l'effet de la radiolyse

La modélisation Thermo-Hydro-Mécanique (THM) du colis C1PG MAVL ICEDA a été réalisée en 2D axisymétrique avec Code_Aster en tenant compte des différents constituants du colis : coulis de blocage des déchets, coulis de calage du panier et béton du conteneur, béton du bouchon. La modélisation néglige la peau métallique interne du conteneur C1PG car elle prend déjà en compte la présence du panier métallique contenant les déchets.

La modélisation est basée sur l'approche des milieux poreux (Biot) en tenant compte des lois classiques de transport (Darcy et Fick pour la perméation et la diffusion) du liquide et du gaz dans les matériaux cimentaires et de la loi de Fourier pour la diffusion de chaleur. Les contraintes mécaniques sont classiquement séparées en contraintes hydrauliques et contraintes effectives selon l'approche de Coussy.

Tous ces phénomènes physiques sont reliés par des couplages forts. Sur le plan mécanique, la loi retenue est une loi élastique sur les contraintes effectives. Les parties métalliques (virole interne et panier) qui ne sont pas poreuses sont quant à elles modélisées en élasticité pure.

La modélisation permet de réaliser un calcul mécanique en température dans une configuration non saturée prenant en compte les résultats de production d'hydrogène par radiolyse du chapitre précédent et tenant compte de l'évolution dans le temps du séchage (ie. du taux de saturation) du colis et des matériaux qui le constituent, dans un environnement donné.

Code_Aster est un code de calcul mécanique disposant d'un module de mécanique des milieux poreux (éventuellement non saturé). Il permet de modéliser l'évolution de la saturation au cours du temps dans le colis (coulis cimentaire de blocage et béton d'enveloppe du colis), la circulation du gaz dans le colis et la quantité de gaz en sortie du colis.

Les résultats du code CHEMSIMUL estimant la production d'hydrogène de radiolyse constituent les données d'entrée pour Code_Aster permettant simplement de piloter une condition limite : la quantité de gaz d'hydrogène produite au cours du temps dans le coulis cimentaire en fonction de l'évolution de son état de saturation. Le couplage entre ces codes n'est pas nécessaire puisqu'il n'y a pas de rétroaction du calcul mécanique vers le modèle de chimie de la radiolyse, ce dernier considérant un milieu homogène et ayant déjà traité toutes les configurations temps/saturation.

Le critère de stabilité mécanique du colis est un critère de non rupture en traction du béton. La valeur de résistance à la traction considérée dans l'étude pour le béton du conteneur et du bouchon est égale à 5.19 MPa. Cette valeur est conservative puisqu'elle constitue la valeur minimale observée lors d'essais réalisés sur plus de 20 échantillons, la moyenne des valeurs étant de 5.8 MPa et la maximale de 6.6 MPa.

L'analyse des contraintes calculées montre qu'il n'y a pas de risque sur la résistance mécanique du colis à cause de la pression induite par les quantités d'hydrogène produits. Les contraintes mécaniques sont en réalité principalement induites par le risque de dessiccation des matériaux cimentaires.

Les hypothèses très conservatrices de comportement élastique linéaire pour les matrices cimentaires constitutives du colis et d'interfaces rigides entre les matériaux ainsi que les faibles humidités relatives dans l'environnement du colis conduisent à des contraintes maximales localement importantes du fait des limites de la modélisation.

**Projet ICEDA - Référentiel de conditionnement des déchets MAVL.
Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PGSP**

ING/DP2D/LP1-DS

Référence :

D305615010794

Indice :

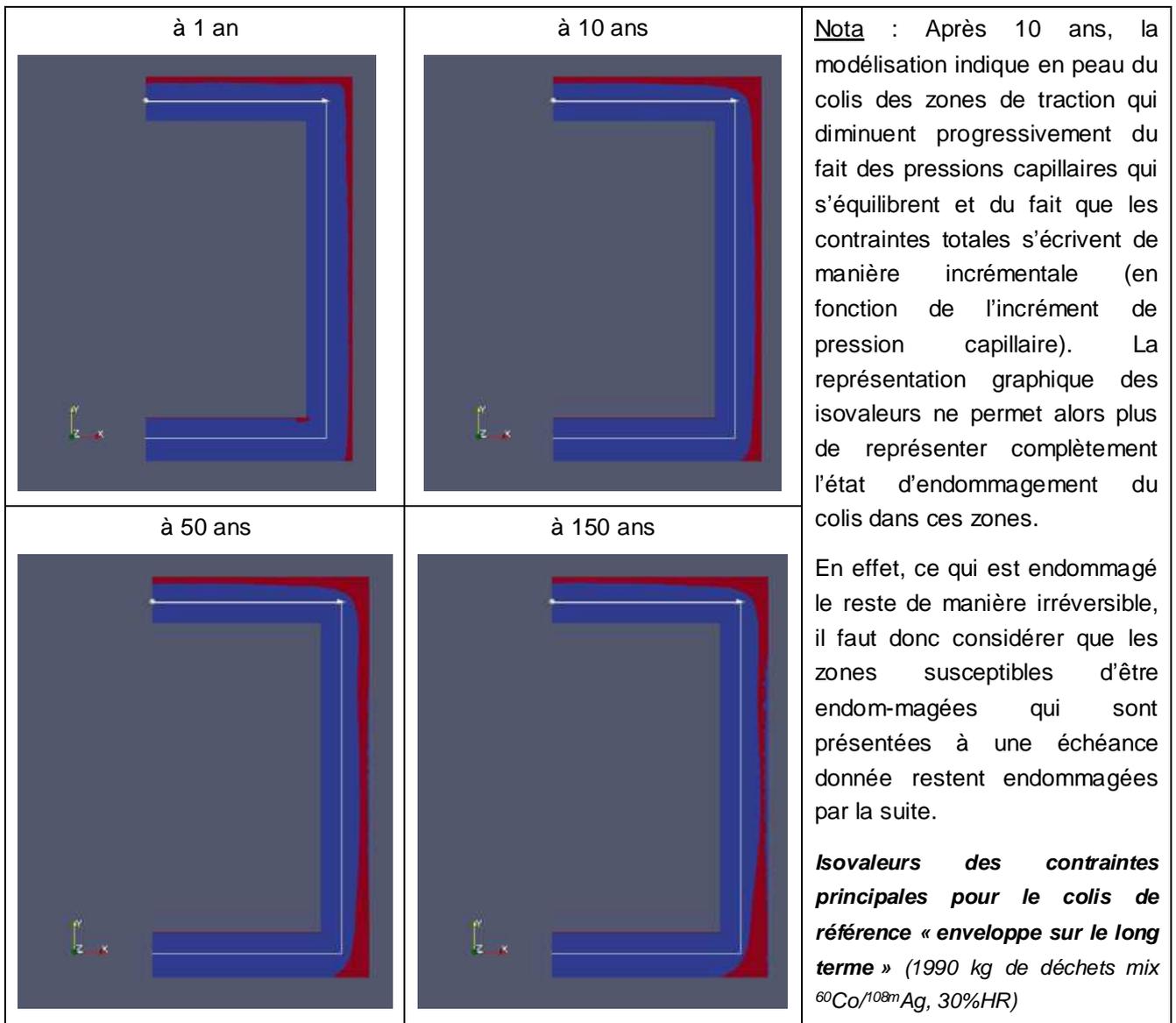
C

Page 49/65

C'est la raison pour laquelle l'analyse des résultats de modélisation doit suivre un raisonnement en termes de zones par rapport au seuil de résistance en traction évoqué ci-avant. Ces zones sont enveloppes des zones qui pourraient fissurer. Dans les figures qui suivent, les zones en rouge correspondent aux tractions supérieures à 5,19 MPa et en bleu inférieures à ce critère.

L'intégration de l'influence de la dessiccation sur la tenue mécanique du colis dans le temps conduit à :

- Constater en peau de colis, dès un an, une petite zone en traction supérieure au critère de résistance (cf. figures ci-après). Celle-ci s'explique par le mécanisme bien connu du séchage, particulièrement accentué dans notre cas par la condition de pression capillaire en bord de colis.
- Déterminer une zone en traction supérieure au critère de résistance de 5,19 MPa dans le béton enveloppe du colis (coque et bouchon) qui se développe avec le temps. Cette zone reste tout de même relativement réduite et concentrée en peau externe du colis (cf. figures ci-après).



Nota : à 1 an, la zone interne inférieure supérieure au critère de 5,19 MPa s'explique principalement par une modélisation qui considère des interfaces infiniment rigides entre les matériaux. La contrainte



**Projet ICEDA - Référentiel de conditionnement des déchets MAVL.
Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PGSP**

ING/DP2D/LP1-DS

Référence :

D305615010794

Indice :

C

Page 50/65

maximale se situe près de l'interface entre la partie métallique (ie. virole interne de la coque) et le béton de la coque.

L'épaisseur de cette zone en traction supérieure à 5,19 MPa (zones en rouge) n'empiète pas dans l'épaisseur requise pour le maintien des propriétés de confinement et de durabilité du colis (cf. § 4.2.5) : les figures illustrent de manière précise le positionnement de l'iso-valeur relative à l'épaisseur de garantie du confinement de l'enveloppe externe du colis (ie. 6.8 cm, matérialisée par un trait blanc) vis-à-vis de la zone en traction supérieure au critère de 5,19 MPa, compte tenu des propriétés du béton en terme de diffusion à l'eau tritiée.

Ces résultats enveloppe compte tenu des hypothèses conservatives confirment qu'une éventuelle dégradation, si elle devait apparaître, dans l'épaisseur de l'enveloppe externe du colis (coque+bouchon) ne serait pas préjudiciable vis-à-vis du caractère confinant du colis, que ce soit au cours des 50 premières années de vie du colis en entreposage à ICEDA ou bien sur la période d'exploitation réversible de CIGEO (d'autant qu'à CIGEO l'humidité relative en visu des colis sera supérieure à 30%HR).

Des résultats équivalents en terme de conservation du caractère confinant du colis sur cette durée de 150 ans sont obtenus lorsqu'on considère une humidité relative de 50% dans l'étude.

6.5 DURABILITE DU COLIS DANS LE TEMPS

Ce paragraphe a pour objectif de décrire et justifier l'évolution du colis dans le temps, et notamment ses caractéristiques mécaniques en lien avec les éventuelles dégradations chimiques et autres phénomènes de corrosion (notamment la corrosion interne).

Différentes pathologies de béton reconnues dans la littérature scientifique peuvent occasionner une dégradation des colis dans le temps et donc présenter un risque vis-à-vis de la durabilité du colis C1PG^{SP} d'ICEDA.

Ces pathologies sont liées aux phénomènes suivants :

- le retrait,
- le retrait par séchage/dessiccation,
- la carbonatation du béton et la corrosion des armatures participant à la tenue mécanique du colis,
- l'alcali-réaction,
- la Réaction Sulfatique Interne (RSI) en lien avec le comportement thermique du colis du fait du mode opératoire de fabrication et des conditions environnant cette fabrication.

Les agréments Andra impliquant le colis C1PG au CSA apportent une première garantie sur la capacité des matériaux cimentaires qui constituent notamment son enveloppe externe à éliminer les risques pathologiques évoqués précédemment.

Ceci étant, de manière générale, la définition, le développement et la mise en œuvre des formulations cimentaires – béton du conteneur et du bouchon, coulis de ciment pour le blocage des déchets en panier et pour le calage du panier dans le conteneur – permettent à travers le choix des constituants de s'affranchir des phénomènes liés aux pathologies telles que mentionnées ci-avant.

Les différents risques pathologiques évoqués sont repris ci-après et sont associés aux dispositions constructives permettant de les maîtriser.

6.5.1 Le retrait

Il existe quatre formes de retrait pour le béton :

- le retrait plastique dû à l'évaporation de l'eau à la surface libre du béton frais ;
- le retrait intrinsèque ou endogène qui résulte d'une perte de volume global du béton au cours de la prise ;
- le retrait thermique (au jeune âge) lié à l'évolution de température du béton pendant la prise avec un effet de contraction après le passage du pic de température du fait de la chaleur d'hydratation du ciment ;
- le retrait hydrique caractérisé par les pertes d'eau de la pâte du ciment. Le risque de fissuration du béton dans la masse et aux interfaces (ie. liaison coque / bouchon) ainsi que les échauffements à la prise du matériau d'immobilisation et du béton du bouchon définitif doivent être maîtrisés lors de la réalisation du colis.

Mesures constructives :

Le béton du conteneur et du bouchon du colis C1PG^{SP} est un béton à hautes performances. Il a été développé à partir du ciment LAFARGE HTS du Teil (ciment CEM I 52,5 SR5 PM) connu pour ses propriétés thermiques modérées. La faible épaisseur du béton garantit la thermique de la coque. Le rapport Eau / Liant équivalent et le squelette granulométrique de ce béton permettent une bonne compacité, ce qui limite les retraits hydriques ;

Pour le coulis, l'emploi d'addition de fumées de silice permet la maîtrise de l'exothermie ;

Le conteneur fabriqué en usine de préfabrication fait l'objet de l'application d'un produit de cure au démoulage. Le contrôle de la réalisation de cette opération est tracé dans le système qualité du fabricant du conteneur : il ne peut pas être réalisé à réception sur le site ICEDA. Enfin, en cellule sur ICEDA, le bouchon de fermeture fait l'objet d'une cure à l'eau pendant 7 jours après sa coulée.

L'ensemble de ces mesures limite le risque de fissuration du colis par retrait. Le phénomène de retrait par séchage/dessiccation du béton des colis en situation d'entreposage à ICEDA est traité au paragraphe suivant.

6.5.2 Retrait par séchage/dessiccation

Du point de vue physique, le séchage peut induire par déformation différentielle entre le cœur et la surface du colis une fissuration superficielle de peau. Mais celle-ci demeure très faible grâce aux caractéristiques BHP du conteneur C1PG^{SP} qui permettent de réduire ces déformations par rapport à des bétons ordinaires. De plus, la bibliographie montre que les processus de séchage sont des phénomènes très lents, y compris pour de faibles taux d'hygrométrie.

Sur le plan industriel, EDF ne dispose pas à ce stade de retour d'expérience d'autres producteurs de déchets sur des colis similaires entreposés déjà sur quelques décennies. Par ailleurs, les halls d'ICEDA ne disposent pas d'équipement de climatisation ou de régulation de l'humidité relative de l'air de ventilation.

L'impact du séchage en condition d'entreposage sur les contraintes mécaniques a été évalué par simulation numérique et présenté au paragraphe 0. De ce point de vue, les résultats disponibles à ce jour prennent en compte l'influence du séchage et montrent qu'il n'y a pas de risque sur la tenue mécanique du colis qui conduirait à une perte de ses propriétés de confinement sur la durée d'entreposage à ICEDA et au-delà, en scénario de stockage direct, sur la durée d'exploitation réversible de CIGEO. Les calculs réalisés disposent a minima des conservatismes suivants :

**Projet ICEDA - Référentiel de conditionnement des déchets MAVL.
Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PGSP**

ING/DP2D/LP1-DS

Référence :

D305615010794

Indice :

C

Page 52/65

- la prise en compte d'un mécanisme de retrait par dépression capillaire très pénalisant pour de faibles valeurs d'humidité relative,
- la prise en compte d'un comportement purement élastique des matériaux poreux (ie. la prise en compte de déformation de fluage dans les matrices cimentaires relaxeraient les contraintes).

Néanmoins, comme évoqué dans le paragraphe 0, la modélisation présente actuellement une limite de domaine de validité en deçà de 50%HR et des travaux sont nécessaires pour élargir ce domaine jusqu'à 30%HR.

Un programme de travail, présenté ci-après, définit les études et les essais complémentaires en cours de réalisation. Au-delà de l'humidité relative de l'air dans les halls, ce programme vise à améliorer les simulations numériques en prenant en compte le retrait et le fluage du béton, à la place du comportement élastique linéaire considéré jusqu'à aujourd'hui dans la modélisation.

Le programme de travail sur la tenue mécanique du colis C1PG^{SP} est cadré autour d'une thèse (2017-2020) dont l'objectif est d'apporter les éléments de validation aux modélisations numériques dans les conditions d'environnement du colis. Les grandes lignes de cette thèse sont :

- Etudes des phénomènes hydriques et du modèle de Van-Genuchten (ou autre éventuellement plus adéquat), pour une large gamme de saturation,
- Etude du retrait de dessiccation instantané pour différentes hygrométries, en particulier pour des humidités relatives faibles dans l'air (autour de 30%HR), à température ambiante dans des conditions dites normales et à 50°C,
- Si possible, étude du fluage et de la relaxation : extension des modèles classiques de fluage au formalisme de la THM et implémentation dans Code_Aster, recalage à partir des essais expérimentaux,
- Recalage global des modèles à partir de l'ensemble des essais (cf. ci-dessous) et réalisation d'une étude industrielle sur le colis C1PG^{SP}.

Des essais sur la matrice béton constitutive de l'enveloppe du colis seront réalisés en accompagnement de ce programme numérique. Les paramètres expérimentaux à évaluer sont détaillés ci-après. Les points 1 et 3 ont été engagés courant 2018, après la définition précise du plan expérimental à suivre. Le point 2 (qui contribue au point 1) a été engagé en 2017 et de premiers résultats sont attendus à fin 2018.

- Mesure des courbes de désorption

Cette caractéristique affecte l'état d'équilibre atteint par l'éprouvette (en termes de saturation) par rapport à l'humidité relative extérieure. La méthode de mesure retenue en priorité consiste en plusieurs essais de séchage indépendants, dont on ne regarde que l'état d'équilibre. Pour cette méthode, on impose une humidité relative à l'extérieure et on mesure la perte de masse d'eau jusqu'à obtention de l'équilibre. Le point d'équilibre correspond à un point sur la courbe de succion (ou désorption). Plusieurs courbes de séchage sont alors établies pour différentes humidités relatives (en allant suffisamment bas pour couvrir un fort séchage). Cette méthode permet également de recalculer la valeur de perméabilité à l'eau.

Les essais seront faits pour deux niveaux de température, à 25°C et 50°C. On étudiera des méthodes complémentaires (par balance de sorption et éventuellement un essai progressif sur éprouvette normale) pour enrichir ces mesures.

- Mesure de perméabilité

La perméabilité à l'eau régit la cinétique de séchage avec la courbe de désorption. On rappelle que dans Code_Aster comme dans la plupart des modèles diphasiques, on distingue la perméabilité intrinsèque K_{int} et la perméabilité relative de la phase p $k_r^p(S)$ comprise entre 0 et 1 et fonction de la saturation S. Cela reste un formalisme et ce que l'on souhaite identifier est une perméabilité à l'eau qui correspondrait dans le modèle à $K_l(S_l) = K_{int} k_r^l(S_l)$. A cela s'ajoute la dépendance à la température. Au final c'est $K_l(S_l, T)$ que l'on souhaite identifier. Pour cela, on se base à minima sur les mêmes essais que ceux décrits ci-dessus. Ce point contribue donc au premier point.

- Mesure mécanique viscoélastique

La loi viscoélastique qui sera, si possible, développée et/ou sélectionnée dans le cadre de la thèse va contrôler le comportement différé : retrait/fluage/relaxation. Il convient donc de recalibrer ce modèle à partir d'essais pertinents sur le béton d'enveloppe externe du colis. Ces essais seront réalisés pour deux températures et pour différentes conditions (notamment séchant ou non séchant).

En fonction du résultat de ces investigations, EDF prendra les dispositions nécessaires afin de surveiller ce phénomène et le cas échéant intervenir. Dans l'attente, EDF propose d'observer une période transitoire suivant laquelle l'humidité relative dans le hall est maintenue à une valeur minimale de 50%HR en limitant la puissance thermique par hall à 30 kW. Le passage des halls à la pleine puissance de 80 kW/hall sera soumise à une autorisation de l'ASN.

6.5.3 Carbonatation du béton et corrosion des armatures

Le ferrailage du conteneur en béton participe à la tenue mécanique du colis en sollicitations mécaniques statique et dynamique. L'éventuelle corrosion de ces armatures peut donc nuire à la cohésion mécanique du colis.

Dans les matériaux cimentaires, dont le pH est compris entre 12 et 13, les aciers non ou faiblement alliés sont placés dans leur domaine de passivité. Dans la mesure où le béton est sain (teneur en chlorures réduite, béton non carbonaté et non fissuré), dans la mesure où les règles de mise en œuvre du conteneur à la fabrication respectent les règles de l'art en matière d'épaisseur de béton d'enrobage des armatures, le risque de corrosion de l'acier des armatures est alors négligeable.

Néanmoins, lors de la fabrication du béton, la quantité d'eau introduite dans la formulation est toujours largement supérieure à la quantité stœchiométrique nécessaire à la formation des hydrates. Lorsque le béton durcit, il se désature en eau et les pores se remplissent partiellement du CO₂ de l'air par diffusion. Il peut aussi sécher de par les conditions ambiantes. Le CO₂ se dissout pour réagir avec la portlandite du ciment hydraté et former du carbonate de calcium. La carbonatation induit alors une diminution du pH jusqu'à des valeurs pouvant être inférieures à 8. Lorsque la zone de carbonatation atteint les armatures en acier, la corrosion du métal s'initie par dépassement menant à terme à la formation de produits de corrosion pouvant conduire à l'éclatement du béton autour des armatures corrodées selon les caractéristiques mécaniques du béton et la géométrie des armatures.

Dispositions constructives :

- En France, la teneur maximale en chlorures dans un béton contenant des armatures en acier est de 0,4% selon la norme NF EN 206 / CN 2014 (teneur en ions Cl⁻ rapportée à la masse de ciment et additions). La

**Projet ICEDA - Référentiel de conditionnement des déchets MAVL.
Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PG^{SP}**

ING/DP2D/LP1-DS

Référence :

D305615010794

Indice :

C

Page 54/65

teneur maximale en chlorures dans la formulation du béton constituant l'enveloppe externe du colis C1PG^{SP} respecte largement ce seuil.

- La carbonatation des bétons hautes performances est réputée négligeable. Les essais accélérés réalisés annuellement depuis au moins dix ans sur le béton servant à la fabrication du conteneur C1PG^{SP} et de son bouchon montrent l'absence de carbonatation à l'échéance de 90 jours. Concernant les modalités de ces essais, le mélange gazeux était composé pour moitié de CO₂ et d'air à 20°C (selon les recommandations AFREM), l'humidité relative de l'air était de 65% (+/- 5% HR). L'indicateur coloré de pH utilisé est une solution de phénolphthaléine dosée à 0,2%.
- A noter, les spécifications Andra du CSA n'exigent aucun essai en matière de carbonatation pour les colis en béton durable admis dans ce centre de stockage.
- A noter également, le bouchon du colis ICEDA n'est pas concerné par le risque de corrosion des armatures suite à la carbonatation du béton étant donné que ce bouchon ne dispose pas d'armature.

Des travaux scientifiques évoquent le risque de fissuration attribué à un retrait de carbonatation à faible humidité relative et en température : il s'agit des travaux de thèse de I. ALLAHYARI⁵ (2016) et de E. DROUET⁶ (2010).

L'analyse par EDF des précédentes thèses indique néanmoins que les résultats présentés ne sont pas transposables au béton du C1PG^{SP} étant donné (i) qu'il s'agit de résultats obtenus sur pâte de ciment et non pas sur béton, (ii) que le béton du C1PG^{SP} bénéficie d'un travail de formulation visant à optimiser son squelette granulaire pour augmenter sa compacité, (iii) que le liant de ce béton est le fruit de la présence de ciment mais aussi d'une addition de fumées de silice.

Par ailleurs, les résultats de ces thèses en matière de fissuration sont obtenus dans une atmosphère particulièrement riche en CO₂ (50% de CO₂) comparé à des conditions atmosphériques telles qu'elles seront dans les halls d'ICEDA (0,04 % CO₂). La représentativité de ces conditions très particulières et de leur impact au niveau de la fissuration fait l'objet de débats dans la littérature scientifique. La pression partielle en CO₂ a une influence sur la nature cristallographique du carbonate de calcium formé (calcite / aragonite / vatérite) et sur la carbonatation de certaines phases des matériaux cimentaires (C-S-H).

Un argumentaire qualitatif du phénomène de carbonatation et du risque de corrosion des armatures associé peut s'appuyer sur les éléments suivants :

- Le phénomène de carbonatation ne constitue pas une pathologie de béton mais au contraire a pour effet de réduire la porosité dans les zones exposées du béton et ainsi de réduire la pénétration de CO₂ dans le béton.
- La fabrication du conteneur C1PG^{SP} intègre les règles de l'art en matière d'épaisseur d'enrobage des armatures (> 40 mm)

⁵ Approche performantielle des bétons : vers une meilleure caractérisation des indicateurs de durabilité – Thèse effectuée au Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) de Toulouse et soutenue le 20 mai 2016 par Ilgar ALLAHYARI

⁶ Impact de la Température sur la Carbonatation des Matériaux Cimentaires — Prise en Compte des Transferts Hydriques - Thèse effectuée au Laboratoire d'étude du comportement des bétons et des argiles (LECBA) du CEA-Saclay et soutenue le 18 novembre 2010 par Emeline DROUET

**Projet ICEDA - Référentiel de conditionnement des déchets MAVL.
Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PGSP**

ING/DP2D/LP1-DS

Référence :

D305615010794

Indice :

C

Page 55/65

- Les conditions d'entreposage des colis sur ICEDA relèvent de la classe XC1 (selon la norme NF EN 206/CN : environnement sec en permanence) : environnement favorable à la carbonatation mais corrosion faible voire nulle en l'absence d'eau. Dans ces conditions, le colis traverse différentes phases :
 - Le béton d'un colis juste fabriqué est saturé en eau. Son pH basique empêche la corrosion des armatures. Par ailleurs le CO₂ pénètre très lentement et le phénomène de carbonatation avec formation d'une couche protectrice de carbonate de calcium se produit essentiellement en surface du béton à l'interface liquide/air (le coefficient de diffusion du CO₂ dans l'eau est 10000 fois inférieur à celui du CO₂ dans l'air).
 - Au fil du temps, le béton sèche progressivement, se désature donc, et laisse pénétrer le CO₂ favorisant ainsi la carbonatation.
 - A long terme, le béton désaturé est carbonaté dans une proportion à évaluer, éventuellement sur une épaisseur pouvant atteindre les armatures, le pH du béton a baissé mais la quantité d'eau porale disponible pour favoriser la corrosion des armatures est potentiellement très faible.

Compte tenu de ces éléments, EDF convient que si les connaissances permettent d'affirmer qu'il n'y a pas de risque de corrosion sur un colis saturé en eau ou bien sur un colis désaturé en ambiance à faible HR, la situation transitoire durant laquelle le béton sèche partiellement et laisse pénétrer le CO₂ peut présenter un risque de corrosion des armatures qu'il est proposé d'investiguer, sur la période 2019-2021, selon les axes suivants :

- Bibliographie sur la carbonatation dans les bétons et les cinétiques de corrosion des armatures,
- Etude d'évaluation de la contrainte générée par le gonflement des armatures, compte tenu de leur diamètre, leur nombre, leur position, etc..., et comparaison de cette contrainte avec la résistance en traction du béton du colis, pour évaluer le risque d'éclatement, en cas de corrosion.
- Essais simples de saturation/désaturation d'éprouvettes en laboratoire et, nouveaux essais de carbonatation accélérée sur éprouvettes équilibrées à une HR selon les conditions du mode opératoire de la norme XP P18-458.
- Simulation numérique à l'aide d'outil tels que HYTEC/CHES du phénomène de carbonatation dans un premier temps tel que caractérisé dans les thèses précitées puis dans un second temps en intégrant les données des essais de carbonatation obtenues sur le béton du colis ICEDA (cf. ci-dessus), cela en vue d'extrapoler le phénomène dans différentes conditions (ICEDA/CIGEO).
- Si besoin, en fonction des résultats obtenus dans le cadre des actions précédentes, réalisation d'essais de carbonatation complémentaires dans des conditions de température et d'hygrométrie plus représentatives des différentes conditions (ICEDA/Cigéo).

6.5.4 Corrosion par aération différentielle

L'aération différentielle est un phénomène qui peut apparaître dans des zones localisées où la teneur en oxygène varie fortement entre une zone riche qui sert de cathode au détriment d'une zone appauvrie qui sert d'anode. Ces zones peuvent résulter d'une hétérogénéité majeure d'épaisseur, de fissures dans le béton atteignant l'acier couplée à de la radiolyse produisant localement un oxydant fort (O₂, H₂O₂...).

Ces oxydants peuvent conduire à une corrosion par aération différentielle s'ils sont produits dans des zones très localisées.

Concernant le risque de corrosion sous radiolyse, les actions menées par le CEA et l'Andra (fiche CORRAD) montrent que ce risque est absent pour des doses inférieures à 20 Gy/h. Aussi, considérant les résultats des études de radiolyse, au regard des valeurs de débit de dose présentées au paragraphe 6.4.2, le débit de dose dans le béton de l'enveloppe externe du colis (ie. conteneur + bouchon) est inférieur à 20 Gy/h après 5 années. Le risque de corrosion par aération différentielle couplé à la radiolyse disparaît donc après 5 ans de vie d'un colis.

Dans les cinq premières années de vie du colis, le risque de corrosion par aération différentielle serait donc lié à des variations significatives de l'enrobage des aciers et/ou de la qualité du béton. Or la conception même du colis ICEDA, le dimensionnement de l'épaisseur de béton, celui des armatures, l'épaisseur d'enrobage des armatures, le choix de la formulation du béton vis à vis de sa durabilité face aux pathologies connues telles que l'alcali-réaction, la réaction sulfatique interne, l'acceptation de ce colis par l'Andra au CSA dans le cadre des colis en béton durables, garantissent une qualité de béton et d'enrobage dans les cinq premières années et bien au-delà. Le risque de corrosion par aération différentielle couplé à la radiolyse est donc absent.

6.5.5 Alcali-réaction

6.5.5.1 Alcali-réactivité du béton du colis C1PG^{SP} d'ICEDA

Une teneur en alcalins mal maîtrisée dans les constituants des matériaux cimentaires du colis peut conduire de manière différée à la réaction alcali-silice.

Le béton constitutif du conteneur C1PG^{SP} et du bouchon du colis ICEDA contient parmi les granulats qui le constituent deux granulats qualifiés PR au sens de la norme NF P 18 594 c'est-à-dire potentiellement réactifs vis-à-vis de l'alcali-réaction.

Ceci étant,

- Le ciment CEM I du Teil utilisé dans la fabrication de ce béton dispose d'une faible quantité d'alcalins mobilisables,
- Le béton fait l'objet d'une addition de fumées de silice,
- Le bilan en alcalins actifs du béton est plus de deux fois inférieur au seuil normatif de la norme FD P 18 464 (3.5 kg de NaO₂ / m³ de béton),
- Sur le parc REP, les tests annuels de performance concernant la RAG menés sur le béton suivant la norme NF P 18-454 ne révèlent pas de problème de gonflement.

Enfin, conformément au CSCT [30] fixant les exigences de confection des charges sèches nécessaires à la fabrication du béton, du fait de la présence de granulats PR dans le béton, celui-ci fait l'objet d'un suivi consistant à réaliser :

- De manière mensuelle, le bilan des alcalins actifs de tous les constituants du béton afin de vérifier que le respect du critère du CSCT [30] : le critère de teneur de la teneur en alcalins actifs du béton inférieur à 2,2 kg/m³ est bien respecté à chaque échéance, la teneur en alcalins actifs étant de l'ordre de 1,1 kg/m³ (observation sur la période de juin à septembre 2017).
- De manière annuelle, un essai de performance sur béton selon la norme NF P 18-454 afin de vérifier le respect du critère de non réactivité du CSCT [30] : L'essai de performance réalisé sur le béton pour la période d'octobre 2016 à octobre 2017 indiquent une non réactivité de la formule béton selon le critère d'expansion des éprouvettes à 9 mois (ie. 40 semaines) inférieure à 0,02 %.



**Projet ICEDA - Référentiel de conditionnement des déchets MAVL.
Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PGSP**

ING/DP2D/LP1-DS

Référence :

D305615010794

Indice :

C

Page 57/65

A noter, le contexte normatif (cf. norme FD P 18 464) stipule une démarche préventive basée sur la mise en œuvre de l'une des deux démarches présentées ci-dessus. EDF fait le choix d'appliquer ces deux démarches simultanément.

Ce suivi réalisé par le fabricant des charges sèches n'a pas fait l'objet d'une alerte. En cas de non-respect d'un des critères, EDF en serait immédiatement informé et le produit ne serait pas livré sur ICEDA.

6.5.5.2 Impact d'une présence de pyrex dans certains déchets

La présence de Pyrex dans certains déchets activés d'exploitation MAVL (crayons poisons des grappes de commande) rend susceptible une réaction de ce Pyrex au contact du matériau cimentaire de blocage des déchets. Le retour d'expérience montre que l'alcali-réaction peut être déclenchée dès 4% en masse de présence de silice réactive dans les granulats du béton. La conséquence d'une telle réaction peut être, sous certaines conditions, la formation d'un gel gonflant dont l'impact mécanique reste à apprécier.

Démonstration

Les choix des constituants du coulis de ciment de blocage des déchets et de calage du panier ainsi que du béton de l'enveloppe externe du colis (conteneur et bouchon) limitent la présence d'alcalins (Na_2O et K_2O dans le ciment ou provenant d'autres origines dans les formulations).

Néanmoins, au-delà de la définition même des formulations cimentaires, la présence de pyrex dans certains déchets a conduit à réaliser une étude expérimentale menée en 2010 [19], mettant en œuvre des éprouvettes de coulis de ciment contenant divers taux de Pyrex d'origine commerciale (22 à 50% de pyrex sur le volume total coulis + pyrex) à des granulométries variées : concassé (ie. fragments 3/20 mm) ou broyée (ie. poudre 0/3 mm). Les essais menés à 60°C répondent aux exigences de la norme NFP 18-454. Ce niveau de température est voisin des températures à cœur d'un colis pénalisant dans l'entreposage (cf. §6.3.2).

Des scénarii d'incorporation de Pyrex ont donc été étudiés à des taux de dopage en alcalins très supérieurs à ceux des conditions du colis C1PG^{SP} d'ICEDA pour les deux taux d'incorporation du Pyrex testés.

Enfin, deux modes de conservation des éprouvettes ont été suivis :

- Conditions représentatives de celles de conservation du colis (ie. échanges hydriques nuls avec l'extérieur liés aux propriétés confinantes de l'enveloppe externe du colis).
- Conditions non représentatives du colis ICEDA, soit un conditionnement normalisé (NF P 18-454 de décembre 2004 pour un béton) des éprouvettes en atmosphère saturée de sorte qu'il soit plus favorable à la réaction alcali-silice.

Les éprouvettes ont été suivies sur une durée d'un an (résistance mécanique, suivi des variations dimensionnelles, examen MEB). Bien que le retour d'expérience d'EDF sur ses ouvrages (ex: barrages hydrauliques) montrent les premiers symptômes d'alcali-réaction à environ 5 ans, les essais menés dans le cadre des colis d'ICEDA sont des essais accélérés dans des conditions de température et de teneurs en alcalins élevées, ceci en présence de pyrex à la réactivité très importante. En conséquence, des essais à 12 mois dans des conditions normalisées sont jugés suffisants pour caractériser le phénomène d'alcali-réaction.

Les éprouvettes sans contact avec de l'eau ne présentent aucun signe de sensibilité à une réaction de type alcali-silice, bien que les dosages en alcalins et les proportions de Pyrex en jeu étaient particulièrement sévères.



**Projet ICEDA - Référentiel de conditionnement des déchets MAVL.
Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PGSP**

ING/DP2D/LP1-DS

Référence :

D305615010794

Indice :

C

Page 58/65

Concernant les éprouvettes conservées en conditions saturées, l'éprouvette témoin (ie. sans Pyrex) est celle présentant le plus fort taux d'expansion. L'échantillon incorporant des fragments de Pyrex a fait l'objet d'une expansion légèrement au-dessus de la limite des 0.03% par an. Ce gonflement obtenu avec une teneur en alcalins majorée d'un facteur 1.5 n'est toutefois pas attribuable à une réaction de type alcali-silice après analyse de la microstructure par microscopie électronique à balayage. En effet, en fonction des conditions hydriques de conservation les coulis sont aisément sujets aux variations dimensionnelles : lors des essais mentionnés, les éprouvettes de coulis non enrubannées et conservées en enceinte maintenue à une température de 60°C en atmosphère humide saturée conformément à la norme NFP 18-454 ont été sujettes à des variations dimensionnelles en relation avec une reprise d'eau.

En conclusion, les résultats du programme d'essais bâti autour de l'essai normalisé mis au point pour des bétons et particulièrement « enveloppe » pour un coulis de ciment, permettent de confirmer la non réactivité du Pyrex dans le coulis, dans les conditions de conservation définies du coulis.

6.5.6 Réaction sulfatique interne

Il s'agit d'une formation différée de cristaux d'ettringite dans le matériau cimentaire, retardée dans le temps, générant un gonflement interne. Cette réaction dépend principalement du choix du liant (teneur en sulfates, en aluminates et en alcalins), de la présence d'eau ou d'humidité et d'un niveau de température mal maîtrisé (température et durée de maintien). Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) définit des catégories d'ouvrages associées à un niveau de conséquences d'apparition des désordres liés à la RSI. Il définit également des classes d'exposition de l'ouvrage vis-à-vis de cette réaction. Le niveau de prévention le plus sévère (Ds) est retenu concernant les colis MAVL d'ICEDA à savoir la catégorie d'ouvrage III (la plus sévère) pour une classe d'exposition XH3 (dans l'eau, très conservative). En conséquence pour ce niveau de prévention, le LCPC/IFSTTAR⁷ recommande une température maximale du béton de 65°C à cœur des matériaux cimentaires, ou bien une température limite de 75°C nécessitant un ciment adapté (à faible chaleur d'hydratation et dont les caractéristiques chimiques répondent aux critères du référentiel de certification de la marque NF) et une validation de la formulation mise en œuvre par un laboratoire indépendant expert en RSI.

Démonstration et dispositions constructives :

Qu'ils s'agissent du blocage des déchets, du calage du panier en conteneur ou de l'enveloppe externe matérialisée par le conteneur et le bouchon de fermeture, les formulations des matériaux cimentaires constituant le colis C1PG^{SP} MAVL mettent en œuvre :

- Le ciment HTS du Teil (ciment CEM I 52,5 SR5 PM) qui présente une spécificité par sa non réactivité vis-à-vis de la réaction sulfatique interne comparé à d'autres ciments du même type. A la connaissance d'EDF, ce ciment n'a jamais développé de RSI ni en laboratoire ni sur ouvrage.
- L'addition de fumées de silice dans des proportions dont les études ont révélé l'efficacité dans la prévention de la réaction. L'emploi de fumée de silice est très favorable à l'inhibition de la réaction sulfatique interne.

Concernant le coulis de ciment utilisé pour le blocage des déchets et le calage des paniers, la porosité élevée de ce coulis (de l'ordre de 50%) permettrait, en cas de développement de cristallisation différée d'ettringite, d'absorber au moins une partie du gonflement, réduisant ainsi ses effets sur le colis. Le volume d'ettringite

⁷ Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux



**Projet ICEDA - Référentiel de conditionnement des déchets MAVL.
Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PGSP**

ING/DP2D/LP1-DS

Référence :

D305615010794

Indice :

C

Page 59/65

néoformée n'a néanmoins pas été estimé. Cependant, la porosité du coulis cimentaire est quatre fois supérieure à celle d'un béton pour une quantité de ciment par unité de volume équivalente à celle d'un béton. Cette porosité élevée constitue donc un facteur favorable à l'absence de gonflement.

Des essais en laboratoire ont enfin été menés sur le coulis de ciment. Bien que les estimations des températures à cœur du colis en phase d'entreposage soient inférieures à 65°C, des essais de RSI sur le coulis cimentaire ont été poussés :

- à 85°C à la prise en montrant des résultats de gonflement satisfaisants,
- à 70°C pendant 10 jours sur éprouvettes durcies en montrant également des résultats de gonflement satisfaisants.

L'observation au microscope électronique à balayage des éprouvettes enrubannées démontre l'absence d'indice de RSI jusqu'à 85°C de chauffe à la prise, le caractère enrubanné de ces éprouvettes étant représentatif des conditions du coulis cimentaire dans le colis **[34]**.

Enfin, le processus et les conditions de fabrication du colis C1PG^{SP} MAVL permettent de maîtriser la température à cœur dans le colis dans le but d'éliminer le risque de RSI. Ce point est développé dans le § 6.3.

Le risque de RSI est en conséquence maîtrisé dans le procédé de fabrication et d'entreposage des colis sur l'installation ICEDA.

6.6 TENUE AU FEU DES COLIS

Les colis C1PG^{SP} MAVL ICEDA contiennent des déchets essentiellement métalliques et sont immobilisés dans une matrice cimentaire. Ils présentent de fait une charge calorifique minimale. Ces colis n'ont fait l'objet d'aucun essai de qualification de tenue au feu dans le cadre des spécifications préliminaires d'acceptation à CIGEO, le GT incendie entre producteurs et Andra n'ayant à ce stade pas encore convergé vers l'épreuve technique à appliquer, ni les familles de colis concernées par cette épreuve.

Dans l'attente, EDF dispose néanmoins d'éléments concernant la tenue au feu des colis C1PG admissibles au CSA à l'Andra. Ces éléments sont les suivants :

- L'exigence de tenue au feu des colis admissibles au CSA ne s'applique pas aux colis dont les déchets sont bloqués à l'aide d'une matrice cimentaire (cf. spécification Andra n° ACO.SP.ASRE.99.001.D). Elle s'applique "lorsqu'un matériau organique est utilisé pour la réalisation du bloc de déchets ou de l'enveloppe".
- C'est la raison pour laquelle EDF a réalisé, en 2014, pour les besoins du parc en exploitation, un essai au feu sur un prototype de colis C1PG contenant une matrice époxy de conditionnement de résines échangeuses d'ions.
- Cet essai a été réalisé conformément à l'épreuve technique Andra n° ACO.SP.ASRE 00-060 " Evaluation du comportement au feu de colis de déchets (E.T. 060)". Un colis C1PG instrumenté en thermocouples a donc fait l'objet d'une exposition à un feu de fioul domestique pendant 30 minutes, avec atteinte d'une température à proximité du colis avoisinant les 1100°C. Les températures intérieures maximales du colis pendant l'essai n'ont pas dépassé 16°C (pour une température ambiante hors feu de 14°C) et ont plafonné au pic à 49°C, 4h30 après la fin de l'essai. Le colis a conservé sa structure et est resté manutentionnable. Il n'a pas fait l'objet d'une auto-inflammation ni d'un éclatement de sa structure. Une perte de masse de 6% a été observée.

Celle-ci est conforme aux exigences de l'Andra qui fixe un seuil à 20% pour l'acceptabilité du colis vis à vis de l'épreuve technique ci-avant mentionnée.

6.7 TENUE DES COLIS A L'IRRADIATION

L'impact d'une activité importante, avec présence de radionucléides à vie longue, a trait à l'effet de l'irradiation des déchets sur les matériaux cimentaires constitutifs du colis.

La bibliographie indique, dans ce domaine, qu'aucun effet n'est mentionné pour des expositions jusqu'à 10^{10} Gy en rayonnement gamma pour les périodes de moins de 50 ans. De plus, les bétons à base de ciments Portland (cas du béton de l'enveloppe externe du colis ICEDA) présentent dans l'ensemble une bonne tenue pour des doses cumulées allant jusqu'à 10^{11} Gy, sans transformation minéralogique. Le rapport Ca/Si du silicate de calcium hydraté (C-S-H), principal hydrate des pâtes de ciment Portland, demeure en particulier inchangé. Ce seuil est à comparer à la dose cumulée enveloppe de $1,25E+07$ Gy, estimée sur 300 ans dans l'enveloppe externe du colis MAVL ICEDA pour le cas de déchets activés d'exploitation "enveloppe" d'un point de vue radiologique et dont le rayonnement est lié à la présence de ^{60}Co et d' $^{108\text{m}}\text{Ag}$.

L'effet majeur de l'irradiation sur les matériaux constitutifs du colis est en conséquence lié au phénomène de radiolyse. Les études menées dans ce domaine démontrent l'absence d'impact mécanique lié à une pression d'hydrogène trop importante sur la structure du colis (cf. § 6.4.4).

6.8 INTEGRITE MECANIQUE DU COLIS A RECEPTION A CIGEO

La durabilité du béton constitutif de l'enveloppe externe du colis C1PG^{SP} MAVL d'ICEDA fait l'objet d'une démonstration validée par l'Andra dans le cadre d'agrément d'acceptation de déchets FMA-vc au CSA conditionnés en colis C1PG en béton durable. Cette durabilité constitue une garantie de conservation des propriétés mécaniques du colis sur une durée pluriséculaire de 300 ans.

Les spécificités du conditionnement des déchets MAVL en colis de même type sur ICEDA sont liées, d'une part, à une activité radiologique plus élevée, et d'autre part, à une ambiance ventilée en hall d'entreposage sur plusieurs décennies. Ces spécificités induisent des phénomènes identifiés comme des potentiels d'altération des propriétés mécaniques du colis fabriqué et entreposé sur ICEDA :

- Le comportement thermique du colis vis-à-vis de la réaction sulfatique interne (RSI)

Les éléments présentés dans le paragraphe 6.3 complétés de la réponse à la Position/Action n°14 [2] apportent la démonstration du respect du critère à cœur de 65°C dans le colis (cf. recommandation du LCPC vis-à-vis de la RSI), considérant le cas d'un colis au maximum de la puissance thermique des déchets (ie. 170 W), dans l'empilement d'un hall totalement rempli, ventilé ou pas. Ce critère étant respecté pour un colis récemment fabriqué puisqu'à 170W l'est d'autant plus pour un colis ayant déjà connu une longue période d'entreposage. Aussi, la réaction sulfatique interne est un phénomène qui ne doit pas causer d'altération des propriétés mécaniques d'un colis après 50 ans de durée d'entreposage à ICEDA.

- L'effet de la production d'hydrogène de radiolyse

Les éléments présentés dans le paragraphe 6.4 complétés de la réponse à la Position/Action n° [2] apportent la démonstration de l'absence d'impact significatif de la pression d'hydrogène sur la structure mécanique du colis considérant des cas d'étude pour lesquels le colis est dans sa phase de production maximale

**Projet ICEDA - Référentiel de conditionnement des déchets MAVL.
Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PGSP**

ING/DP2D/LP1-DS

Référence :

D305615010794

Indice :

C

Page 61/65

d'hydrogène. La décroissance radiologique aidant, les effets de la production de gaz de radiolyse sur le comportement mécanique d'un colis après 50 ans d'entreposage à ICEDA sont jugés négligeables.

- L'effet de l'irradiation des déchets sur le béton du colis

Tenant compte de l'activité radiologique élevée des déchets (limitée à 400 TBq en β/γ forts) et de la présence de ciment Portland dans le béton de l'enveloppe externe du colis ICEDA, la dose cumulée équivalente sur 300 ans vue par ce béton est inférieure de quatre décades au seuil à partir duquel l'irradiation peut avoir un effet sur la microstructure du béton (cf. §6.7). L'irradiation des déchets sur les caractéristiques mécaniques du béton du colis sont donc jugés négligeables.

- L'effet de la dessiccation du béton du colis sur plusieurs décennies

Sur la base des éléments de réponses fournis aux paragraphes 0 et 6.5.2, complétés de la réponse à la Position/Action n°15 [3], au stade actuel de nos connaissances et de nos modèles, il est estimé, après 50 ans d'entreposage, une épaisseur de béton depuis la surface externe du colis susceptible de connaître de la fissuration. Néanmoins, cette estimation n'est pas préjudiciable au caractère confinant et durable du colis. L'épaisseur de béton potentiellement dégradable reste en deçà des 6,8 cm nécessaires au maintien des propriétés de confinement du colis, et en deçà des 5 cm d'épaisseur nécessaire à la tenue mécanique statique du colis en situation d'entreposage. Le programme de travail évoqué au paragraphe 6.5.2 a vocation à affiner l'estimation donnée à ce stade de nos connaissances.

Les éléments de synthèse précédents conduisent à considérer qu'après 50 ans d'entreposage à ICEDA, la structure mécanique des colis est suffisamment intègre vis-à-vis des sollicitations occasionnées par un gerbage des colis sur 3 niveaux dans l'entreposage ICEDA, le colis étant conçu à la base pour un gerbage jusqu'à 6 niveaux dans les alvéoles du CSA.

Ces mêmes éléments, associés aux résultats d'essais d'incendie réalisés conformément au référentiel d'exigences du CSA sur un prototype de colis neuf avec matrice de blocage organique tel que mentionné au paragraphe 6.6, permettent un niveau de confiance très satisfaisant vis-à-vis de la tenue au feu d'un colis sans matière organique après 50 ans d'entreposage à ICEDA, même s'il devait être altéré par le phénomène de séchage/dessiccation. EDF ne dispose néanmoins pas de démonstration formelle sur ce point.

Enfin, concernant le comportement du colis vis-à-vis de sa tenue à la chute, l'état actuel de nos connaissances indique que les propriétés mécaniques du béton des colis peuvent néanmoins être impactées par les conditions hydriques en hall d'entreposage lorsque ceux-ci sont pleins et portent une puissance thermique totale de 80 kW/hall :

- Une étude plus complète que les essais normatifs standards est initiée sur la carbonatation du béton du colis afin de s'assurer que ce phénomène ne favorisera pas une corrosion des armatures du colis en situation d'entreposage (cf. §6.5.3).
- Un travail de thèse a également été engagé sur le thème du séchage/dessiccation du béton du colis afin de confirmer la validité des résultats de calculs présentés au paragraphe 6.4.5 pour des humidités relatives faibles (autour de 30%HR).

Dans l'attente des résultats de ces travaux, EDF propose dans le paragraphe 6.5.2 de limiter la puissance thermique par hall d'entreposage afin de conserver une humidité relative dans les halls d'au moins 50%HR permettant une meilleure maîtrise des impacts potentiels de la carbonatation et de la dessiccation sur le béton des colis.



**Projet ICEDA - Référentiel de conditionnement des déchets MAVL.
Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PGSP**

ING/DP2D/LP1-DS

Référence :

D305615010794

Indice :

C

Page 62/65

Dans l'impossibilité matérielle de pouvoir tester de manière expérimentale la chute d'un prototype de colis qui aurait connu une phase préalable similaire à un entreposage de 50 ans dans les conditions thermiques et hydriques des halls d'ICEDA, EDF propose au-delà des travaux décrits précédemment :

- De démontrer de manière qualitative par simulation numérique le comportement à la chute d'un colis dont les propriétés auront été dégradées. Une étude actuellement en cours comparera dans un premier temps les résultats de simulation à la chute d'un colis neuf qui a fait l'objet d'un essai de chute expérimental à l'échelle 1,
- De conserver en hall d'entreposage un ou plusieurs colis confectionnés au cours des essais inactifs d'ICEDA (donc sans Becquerel en présence) afin de les faire « vieillir » dans les conditions d'entreposage et les soumettre à des essais de chute à des échéances à définir.

7 COMPORTEMENT A LONG TERME DU COLIS EN SITUATION DE STOCKAGE GEOLOGIQUE PROFOND ET LE RELACHEMENT DES RADIONUCLEIDES

Le colis C1PG est un colis en béton durable au sens des exigences d'acceptation des colis au CSA (durée pluriséculaire, 300 ans pour le CSA). Cette durabilité est garantie par le choix du ciment, le choix des constituants et les conditions et moyens de mise en œuvre, permettant de limiter les risques de pathologies connues des matériaux cimentaires comme la RSI, l'alcali-réaction, la corrosion des armatures.

Au-delà d'une période pluriséculaire de durabilité du colis, EDF estime, sur le plan quantitatif, qu'il n'y a pas de lien direct entre les modèles de relâchement et la dose estimée à l'exutoire, même pour des relâchements sur plusieurs centaines de milliers d'années. Néanmoins, sur le plan qualitatif, EDF propose, au-delà de 300 ans, un modèle simple de relâchement des radionucléides dans l'attente de résultats d'études proposant un modèle plus adapté pour estimer la production d'hydrogène par corrosion métallique des déchets.

7.1 FAMILLE DE COLIS EDF-080 : COLIS C1PG DE DAE REP

Il s'agit de déchets métalliques activés : Alliage Zircaloy, acier inoxydable, alliage Ni, AIC, B4C.

Dans l'attente des éléments de démonstration complémentaire portant notamment sur les effets du séchage, l'enveloppe externe en béton du colis valorisée pendant 300 ans est pris comme hypothèse, comme cela a été fait dans le cadre de l'acceptation des colis C1PG au CSA.

Au-delà de 300 ans, EDF retient dans le cadre d'une modélisation du comportement long terme des colis en alvéoles de stockage un modèle labile à $t_0 + 300$ ans considérant les radionucléides de la totalité des déchets en présence comme tous disponibles à cette échéance.

EDF conçoit que cette approche, satisfaisante par son caractère enveloppe du point de vue du comportement long terme des colis, soit très pénalisante si elle conduit, dans le même temps, à considérer comme phénomène induisant le relâchement des RN à $t_0 + 300$ ans une corrosion « instantanée » des déchets métalliques, et consécutivement, un important dégagement instantané d'hydrogène dans le milieu.

C'est la raison pour laquelle un programme d'études est en cours afin de mieux évaluer les vitesses de corrosion des déchets métalliques, et dans le même temps, l'effet de cette corrosion sur la production totale d'hydrogène par les colis. Son objectif est donc double : proposer un modèle moins pénalisant sur la cinétique de relâchement des radionucléides, assimilable aux cinétiques de corrosion des déchets, et quantifier la production d'hydrogène des colis à Cigéo. Les grandes lignes de ce programme sont les suivantes :

**Projet ICEDA - Référentiel de conditionnement des déchets MAVL.
Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PGSP**

ING/DP2D/LP1-DS

Référence :

D305615010794

Indice :

C

Page 63/65

- Tenir compte de la variabilité des alliages métalliques en fonction de la nature des déchets dans les colis C1PG^{SP} MAVL ICEDA

L'étude est focalisée sur l'acier au carbone, l'AIC (alliage Argent Indium Cadmium) et l'acier inoxydable principaux contributeurs potentiels au dégagement d'hydrogène. Parmi les autres alliages composant l'inventaire des déchets, le Zircalloy, les stellites, l'Inconel et le Tantale sont connus pour avoir une grande résistance à la corrosion, y compris dans des milieux très agressifs. Ces alliages créent une couche passivante au contact de l'eau : ils forment une couche d'oxydes stables qui protège la surface de la corrosion. Pour ces alliages, la vitesse de corrosion et les dégagements d'hydrogène pourront être supposés négligeables tant que le colis est valorisé (de 0 à + 300 ans), et une vitesse de corrosion enveloppe issue de la littérature pourra leur être affectée pour l'évaluation du relâchement de l'inventaire radiologique à long terme.

- Evaluer la production d'hydrogène par corrosion dans des conditions thermiques et chimiques (coulis cimentaire) représentatives d'un colis en situation de stockage

Des essais visent à mesurer la quantité d'hydrogène formée par la corrosion de matériaux métalliques d'intérêt au premier ordre (cf. ci-dessus) dans un milieu cimentaire et en température : ils portent sur des échantillons métalliques sous forme de poudre, de granules ou de plaquettes, introduits dans un réacteur contenant de la poudre de coulis cimentaire saturée en eau, en atmosphère inerte dans un milieu thermiquement régulé. L'évolution du système est ensuite caractérisée par mesures et analyses de la pression totale, de la concentration d'hydrogène dans la phase gaz, de la chimie du milieu réactionnel, du pH et de la perte de masse.

Ces résultats d'essais, associés aux surfaces spécifiques des déchets de la famille EDF-080, permettront donc d'estimer à terme la production d'hydrogène de corrosion métallique de ces déchets dans les colis correspondants. Les conditions opératoires retenues pour ces essais (saturation et température) présentent un caractère pénalisant vis-à-vis des phénomènes de corrosion et donc du dégagement d'hydrogène sur les périodes de stockage réversible et post-fermeture.

7.2 FAMILLE DE COLIS EDF-090 : C1PG DE DAD 1ERE GENERATION

La plus grande diversité des matériaux en présence rend l'analyse plus difficile. Par ailleurs, il est difficile d'estimer l'épaisseur minimale des pièces après cisailage. EDF ne considère donc pas de performance de rétention liée aux pièces métalliques.

En conséquence, EDF propose de considérer une disponibilité complète des radionucléides en présence, dans l'attente d'une étude liant par typologie de déchets leurs alliages à leurs surfaces spécifiques en colis, afin d'estimer des vitesses de relâchement et la production d'hydrogène par corrosion correspondante.

8 QUALIFICATION DU PROCEDE DE FABRICATION DES COLIS MAVL SUR ICEDA

La qualification du procédé consiste à apporter l'assurance que le procédé de fabrication des colis mis en œuvre permet d'atteindre les exigences spécifiées pour le colis de déchets. Cette qualification repose d'ores et déjà sur de multiples résultats d'essais réalisés en amont d'ICEDA :

- Essais internes EDF de fabrication de plusieurs prototypes de colis à l'échelle 1, avec résistance électrique simulant la thermique des déchets, sur la base des formulations cimentaires de coulis et béton déployées sur ICEDA, respectant les recettes des gâchées et les temps de prise entre chaque opération (blocage / calage /



**Projet ICEDA - Référentiel de conditionnement des déchets MAVL.
Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PGSP**

ING/DP2D/LP1-DS

Référence :

D305615010794

Indice :

C

Page 64/65

bouchage), le refroidissement du coulis de blocage, la vibration du béton de bouchage, le temps de cure du bouchon.

- Essais réalisés en usines, par le groupement en charge de la construction et de la mise en service d'ICEDA : essais relatifs aux installations et matériels conventionnels de mise en œuvre des matériaux cimentaires, essais relatifs aux matériels aidant à la mise en œuvre à distance en cellules chaudes.
- Analyses sur matériaux cimentaires frais et durcis à l'occasion des essais décrits ci-avant.

Cette qualification sera complétée sur l'installation ICEDA par les essais préliminaires (ie. matériels un à un), les essais d'ensemble, les essais de performances en inactif. A réception de l'autorisation de l'ASN de produire des colis sur ICEDA, cette qualification intégrera enfin les résultats des essais en actif. Un document de synthèse présentant les résultats de la qualification du procédé de fabrication des colis C1PG^{SP} MAVL sur ICEDA sera présenté.



ANNEXE 1 – PLAN DU CONTENEUR C1PG^{SP}

[]