

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 5/84

SYNTHESE

Ces déchets sont issus du démantèlement des réacteurs nucléaires de première génération, de Creys-Malville, de Fessenheim et également de l'exploitation, de la maintenance et d'éventuelles modifications des réacteurs nucléaires du parc français actuel : ils correspondent aux familles élémentaires EDF-080 (précisément EDF-080A pour les colis de DAE à dominante énergétique ^{60}Co et EDF-080B pour les colis de DAE chargés en complément d' $^{108\text{m}}\text{Ag}$), EDF-090 et EDF-100 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 des Décisions N° 2017-DC-0587 et N° 2023-068099 [44] relative au conditionnement des déchets radioactifs, notamment dans ICEDA, et aux conditions d'acceptation des colis de déchets radioactifs dans les installations nucléaires de base de stockage.

Il constitue la version publique de la pièce n°2 du référentiel de conditionnement associé.

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.


	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
	DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0

SOMMAIRE

1	EVOLUTION DU DOCUMENT.....	9
2	OBJET	9
3	DOCUMENTS DE REFERENCE	10
4	PROGRAMME DE QUALIFICATION DU CONTENEUR C1PG^{SP}.....	12
4.1	CONFORMITE AU PLAN SPECIFICATEUR.....	12
4.2	EPAISSEUR DE L'ENVELOPPE.....	12
4.2.1	Epaisseur de confinement.....	13
4.2.2	Epaisseur de tenue mécanique	13
4.2.3	Epaisseur dégradable du conteneur.....	14
4.2.4	Epaisseur minimale du conteneur	14
4.2.5	Epaisseur réelle de l'enveloppe externe de béton du colis	15
4.3	PERFORMANCE DE CONFINEMENT.....	15
4.4	CONSTITUANTS	16
4.4.1	Ciment.....	16
4.4.2	Granulats	16
4.4.3	Eau de gâchage	17
4.4.4	Adjuvants	17
4.4.5	Additions	17
4.5	FORMULATION DU BETON.....	17
4.5.1	Dosage du ciment	17
4.5.2	Fumées de silice	17
4.5.3	Rapport eau totale sur liant hydraulique	17
4.5.4	Formulation du béton	18
4.6	CARACTERISTIQUES MESUREES ET/OU SPECIFIEES DU BETON	19
4.6.1	Caractéristiques physico-chimiques	19
4.6.2	Caractéristiques mécaniques	20
4.7	CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DU CONTENEUR.....	21
4.7.1	Absence de polystyrène	21
4.7.2	Parties métalliques du conteneur	21
4.7.3	Caractéristiques du système d'obturation.....	22
4.7.4	Continuité et homogénéité du conteneur	22
4.7.5	Caractéristiques complémentaires à mesurer.....	23
4.8	RESISTANCE AUX CYCLES THERMIQUES	24
5	PROGRAMME DE QUALIFICATION DU COULIS CIMENTAIRE	24

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 7/84

5.1	FORMULATION DU COULIS	24
5.2	CARACTERISTIQUES MESUREES DU COULIS	25
5.2.1	Caractéristiques physico-chimiques	25
5.2.2	Caractéristiques mécaniques	28
6	PROGRAMME DE QUALIFICATION DU COLIS FINI	28
6.1	MASSE MAXIMALE DU COLIS FINI.....	28
6.2	CARACTERISTIQUES MECANIQUES	28
6.2.1	Gerbage.....	28
6.2.2	Chute	29
6.3	COMPORTEMENT THERMIQUE DU COLIS.....	30
6.3.1	Comportement thermique du colis en phase de blocage des déchets	31
6.3.2	Comportement thermique des colis en phase d'entreposage	39
6.3.3	Conclusion	42
6.4	CORROSION DES DECHETS ACTIVES DANS LE COLIS	42
6.4.1	Détermination expérimentale des vitesses de corrosion	42
6.4.2	Estimation du débit annuel de production d'hydrogène de corrosion	44
6.5	RADIOLYSE	45
6.5.1	Configurations enveloppes et pénalisantes de colis de déchets	47
6.5.2	Evaluation du débit de dose dans les colis	50
6.5.3	Evaluation de la production d'hydrogène de radiolyse.....	52
6.5.4	Capacité du colis C1PG ^{SP} MAVL ICEDA à évacuer l'hydrogène de radiolyse et de corrosion des déchets.....	56
6.6	RÉSISTANCE MÉCANIQUE DU COLIS C1PG ^{SP} MAVL ICEDA SOUS L'EFFET DU SÉCHAGE ET DE LA PRODUCTION D'HYDROGENE	57
6.6.1	Modélisation Thermo-Hydro-Mécanique.....	57
6.6.2	Résultats de la modélisation.....	58
6.6.3	Influence de la perméabilité du béton.....	61
6.7	DURABILITÉ DU COLIS DANS LE TEMPS	63
6.7.1	Le retrait.....	63
6.7.2	Retrait par séchage/dessiccation.....	64
6.7.3	Carbonatation du béton et corrosion des armatures	66
6.7.4	Corrosion des armatures de l'enveloppe confinante en béton du colis	69
6.7.5	Corrosion par aération différentielle.....	72
6.7.6	Alcali-réaction.....	72
6.7.7	Réaction sulfatique interne	74
6.8	TENUE AU FEU DES COLIS	76
6.9	TENUE DES COLIS À L'IRRADIATION	76
6.10	INTEGRITE MÉCANIQUE DU COLIS A RECEPTION A CIGEO	77

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 8/84

7	COMPORTEMENT A LONG TERME DU COLIS EN SITUATION DE STOCKAGE GEOLOGIQUE PROFOND ET LE RELACHEMENT DES RADIONUCLEIDES	81
7.1	FAMILLE DE COLIS EDF-080 ET EDF-100 : COLIS C1PG DE DAE ET DAD REP.....	81
7.2	FAMILLE DE COLIS EDF-090 : C1PG DE DAD 1 ^{ÈRE} GÉNÉRATION.....	82
8	QUALIFICATION DU PROCEDE DE FABRICATION DES COLIS MAVL SUR ICEDA	82

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 9/84

1 EVOLUTION DU DOCUMENT

Indice	Modifications
0	Création du document : ce document correspond à la version publique de la note D305615010794 à l'indice H : « Projet ICEDA – Référentiel de conditionnement des déchets MAVL. Pièce n°2 : Programme de qualification des colis C1PG ^{SP} ». A ce titre, les barres de révision dans le présent document correspondent aux évolutions entre l'indice G et l'indice H de la note D305615010794.

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, de Fessenheim et également de l'exploitation, de la maintenance et d'éventuelles modifications des réacteurs nucléaires du parc français actuel : ils correspondent aux familles élémentaires EDF-080 (précisément EDF-080A pour les colis de DAE à dominante énergétique ⁶⁰Co et EDF-080B pour les colis de DAE chargés en complément d'^{108m}Ag), EDF-090 et EDF-100 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 des Décisions N° 2017-DC-0587 et N° 2023-068099 [44] relative au conditionnement des déchets radioactifs, notamment dans ICEDA, et aux conditions d'acceptation des colis de déchets radioactifs dans les installations nucléaires de base de stockage.

Il constitue la version publique de la pièce n°2 du référentiel de conditionnement associé.

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 selon les cas 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, mais également dans des conditions représentatives de la vie des colis sur ICEDA, en particulier concernant la température. 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

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 10/84

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 H : Projet ICEDA – Référentiel de conditionnement des déchets MAVL. Pièce n°1 : spécifications de production et d’entreposage des colis C1PG^{SP}
- [24] D305615010794 ind H : Projet ICEDA – Référentiel de conditionnement des déchets MAVL. Pièce n°2 : programme de qualification des colis C1PG^{SP}
- [25] D305615010796 ind H : – Projet ICEDA – Référentiel de conditionnement des déchets MAVL – Pièce n°3 : plan de contrôles du procédé et des colis C1PG^{SP}
- [26] []
- [27] []
- [28] []
- [29] []
- [30] []

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 11/84

[31] []

[32] []

[33] []

[34] []

[35] []

[36] []

[37] []

[38] []

[39] []

[40] []

[41] []

[42] []

[43] []

[44] []

[45] Décision ASN CODEP-DRC-2023-068099 du 18 décembre 2023 approuvant et encadrant le conditionnement en colis C1PG^{SP} de déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL) produits par EDF dans l'installation nucléaire de base n° 173, dénommée Iceda

[46] []

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
	DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0

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 ainsi qu'aux limites fixées dans les spécifications préliminaires d'acceptation des colis à CIGEO (cf. [34]). Les critères à respecter sont vérifiés dans le cadre des audits annuels de surveillance du fournisseur des 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.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 13/84

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 2020, sur 3 échantillons fournis au CEA par EDF, selon l'épreuve technique Andra ET053 (cf. ACO.SP.ASRE 00-053/C) sur le béton du colis C1PG (même béton que C1PG^{SP}).

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

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.

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

	<p align="center">RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE</p>		
<p>DP2D_FD-DP2D</p>	<p>Référence : D455524009198</p>	<p>Indice : 0</p>	<p>Page 14/84</p>

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.99.004D),

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 : $I_{deg} = 0 \text{ cm}$.

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/CN ; 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 : $I_{deg} = 4 \text{ cm (cas pénalisant)}$.

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. [4]).

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 52,5 N SR5 CE PM-CP2 NF (Prise Mer – Sulfate Résistant).
- 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 :

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

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

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 15/84

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, cf. spécification sur le paramètre garanti ad hoc en Pièces 1 et 3 du RCC [23], [25]).

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 ($l_{conf}+l_{deg}$)

La révision de la valeur du coefficient de diffusion « D_e » à l'eau tritiée (cf. § 4.2.1) a permis de réduire l'épaisseur de confinement requise de 6,8 à 5,4 cm et ainsi de réduire la spécification initiale de 14 cm sur l'épaisseur de béton du bouchon de fermeture du colis en la réduisant à la valeur de [] cm (cf. spécification sur le paramètre garanti ad hoc en Pièces 1 et 3 du RCC [23], [25]).

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 suremballage 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.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 16/84

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 :

$$D_e = [] \times l_{conf}$$

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}, un nouvel essai de diffusion à l'eau tritiée a été réalisé par le CEA, en 2020 selon l'épreuve technique (cf. ET053 de l'Andra, référence ACO SP ASRE 00 053/C) validée par l'Andra [6]:

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

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 SR5 CE PM-CP2 NF Lafarge du Teil, fourni par un cimentier sur le territoire français, titulaire 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 la norme précitée.

Des essais de contrôle de fabrication (SO_3 , Cl⁻, MgO, Na₂O 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 sulfates (SO_3) est mesurée suivant la norme NF EN 1744-1. La teneur en ions sulfates 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 gravillons.

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 (cf. [31]).

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 17/84

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

La fabrication du béton de bouchage est réalisée conformément à la référence [41] par l'unité de préparation du béton équipée d'un malaxeur à béton à train valseur. La formulation du béton de bouchage est identique à celle du béton utilisé pour la fabrication de la coque C1PG^{SP}.

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 = Eau totale / (Ciment + kA)

Avec : Eau totale = eau libre + eau granulats + eau adjuvants

- A = additions prises en compte pour le liant hydraulique
- k = 2 pour les fumées de silice.
- Le rapport eau totale sur liant équivalent E/L est $\leq []$.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 18/84

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 :

T0_m = début du malaxage à sec (compté à partir de la fin de la vidange de la sachette, le malaxeur tourne dès le début de la vidange) ;

T0_m + 1 minute (± 10 secondes) : introduction de l'eau + adjuvant superplastifiant ;

T0_m + 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 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

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 19/84

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 NF EN 12350-2 compris entre 190 et 240 mm à la mise en œuvre du béton sur le colis. Néanmoins, compte tenu de la réalisation des actions téléopérées et de l'impossibilité d'accès à la benne et au bouchon en cas de perte d'ouvrabilité, les valeurs cibles d'ouvrabilité à respecter sont réduites, en fin de séquence de malaxage, à 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).

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.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 20/84

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 théorique du béton est de 2470 kg/m³ à l'état frais. La porosité moyenne est évaluée à 7% (cf. [8]).

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 ≥ 50MPa. Les résultats sont les suivants [8]:

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 21/84

- 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 $\geq 5,4$ MPa. Les résultats sont les suivants [8]:

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

4.7 CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DU CONTENEUR

4.7.1 Absence de polystyrène

Comme évoqué en introduction du paragraphe 4, 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 échangeuses d'ions 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 potentiel 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 observée 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

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
	DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0

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 12 cm (cf. spécification sur le paramètre garanti ad hoc en Pièces 1 et 3 du RCC [23], [25]).

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 [10].

Aucun débit sortant n'a été constaté durant toute la durée de l'essai [11]. 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.

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} [12].

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
	DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0

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 [13] :

- 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, [14]).

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 jrs).


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

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 24/84

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 $\Delta l/l$ est inférieur à 400 $\mu\text{m/m}$ [8] :

- $\Delta l/l = -[] \mu\text{m/m}$ (Adjuvant 1) ;
- $\Delta l/l = -[] \mu\text{m/m}$ (Adjuvant 2) ;
- $\Delta l/l = -[] \mu\text{m/m}$ (Adjuvant 3).

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

- $F^2/F_0^2 = []$ (Adjuvant 1) ;
- $F^2/F_0^2 = []$ (Adjuvant 2) ;
- $F^2/F_0^2 = []$ (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

La fabrication du coulis de blocage et de calage est réalisée conformément à la référence [41] par l'unité de préparation du coulis équipée d'un malaxeur à train valseur avec agitateur.

5.1 FORMULATION DU COULIS

La formulation du coulis cimentaire a été développée par EDF.

[]

L'incertitude sur le dosage est de +/- 2%.

La plage de dosage maximale à prévoir concernant le superplastifiant est de 0,5 à 12 kg/m^3 . 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.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 25/84

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.

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 $t_0 + DPU$.

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.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 26/84

L'objectif de ce coulis est 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 :

	<p><u>Prototype à l'échelle 1 de 2006, découpé le 30/11/06.</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - 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. <p>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.</p>
	<p><u>Prototype à l'échelle 1 de 2008, découpé le 06/03/08.</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - 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. <p>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.</p>
	<p><u>Prototype à l'échelle 1 de 2016, découpé en fin 2016 (ie. plusieurs jours de découpe).</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - 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. <p>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 entre les déchets pour tous les remplir.</p>

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

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
	DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0

- 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 ± 2°C et à 65 ± 5% d'humidité relative de l'air.

Le retrait mesuré à 28 jours est de - [] µm/m ([15], [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 (Ø = 5,5 cm h = 13 cm) ([16], [18]).

Les résultats obtenus sont les suivants :

Masse volumique en l'état	Masse volumique saturée	Masse volumique sèche	Porosité (%) à 90 jours
1,77 t/m ³	1,77 t/m ³	1,23 t/m ³	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 théorique du coulis est de 1737 kg/m³ à l'état frais.

5.2.1.6 Composition élémentaire

[]

(en pourcentage massique).

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 28/84

5.2.2 Caractéristiques mécaniques

5.2.2.1 Résistance à la compression

La résistance mécanique en compression (R_c) du coulis a été mesurée sur éprouvette (11/22 cm), à 28 et à 90 jours, suivant la norme NF EN 12390-3.

Les résultats sont les suivants ([17], [19]) :

- R_c à 28 jours : [] à [] MPa ;
- R_c 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 [19] :

- 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 du procédé de conditionnement de déchets radioactifs sur ICEDA est de 6400 kg.

6.2 CARACTERISTIQUES MECANQUES

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 quatre niveaux (ie. trois sur un selon un rangement en piles) 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 : en effet, l'épaisseur de béton du voile du conteneur de 156 mm minimum (cf. § 4.1) soustraite de l'épaisseur dégradable du conteneur de 4 cm (cf. § 4.2.3) garantit une épaisseur restante supérieure à l'épaisseur de tenue mécanique de 5 cm (cf. § 4.2.2)

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 29/84

exigée par l'Andra dans le cadre du CSA (§ 3 de la spécification particulière 99.004.D) vis-à-vis d'une tenue sous charge relative à une pression de 0.35 MPa appliquée à la section horizontale du colis.

- 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 6.7.2.

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 ([12], [13]).

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 CYCLIFE France / VINCI, Chazey 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.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 30/84

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 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.

Ces résultats 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. Au-delà, ils permettent de qualifier le caractère prédictif d'un modèle aux éléments finis développé en dynamique pour réaliser des simulations numériques d'essai de chute (cf. § 6.10).

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 significativement 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 Réaction Sulfatique Interne (RSI) au colis doit en conséquence être prévenu.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 31/84

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. § 6.7.7) 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, pour certains pénalisants et « enveloppe », 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


Rappelant en premier lieu qu'un objectif majeur sur ICEDA est de remplir au mieux le volume utile des paniers de déchets des colis afin d'en limiter le nombre à l'exutoire, des essais semi-représentatifs du processus de conditionnement des déchets MAVL en colis C1PG^{SP} à ICEDA ont été réalisés en laboratoire, dans des

	<p align="center">RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE</p>		
<p>DP2D_FD-DP2D</p>	<p>Référence : D455524009198</p>	<p>Indice : 0</p>	<p>Page 32/84</p>

conditions « pénalisante », en 2009 [20], 2015 et 2016, à l'échelle 1. Ces essais ont mis en œuvre une quantité limitée à 400 kg de déchets métalliques postiches en acier noir (2009) et acier inox (2015) afin de maximiser le volume de coulis et l'exothermie associée à la prise (1990 kg de déchets inox lors de l'essai de 2016), une canne chauffante parmi ces déchets afin de simuler une puissance thermique de 170 W relative à 400 TBq équivalent ⁶⁰Co par colis et considérant, selon les essais, une température ambiante de 20, 30 ou 40°C et une température du coulis inférieure à 20°C.

Les principaux résultats de ces essais tirés des résultats de mesures des thermocouples en place dans les prototypes de colis sont les suivants :

- Au cours de la phase de blocage des déchets dont la durée observée pour la prise du coulis est de 48 heures, l'exothermie lors de la prise du coulis est largement prépondérante devant la puissance thermique des déchets.
 - La température initiale du coulis et la température ambiante lors du blocage des déchets influe significativement sur le niveau du pic thermique dans le coulis.
 - Essai 2009 : pour une température du coulis inférieure à 20°C, 400 kg déchets métalliques en acier noir avec résistance chauffante à 170 W et 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.
 - Essai 2015 : pour une température du coulis à 12°C, 400 kg déchets métalliques inox avec résistance chauffante à 170 W et de l'ordre de 30°C d'ambiance, le critère de 75°C dans le coulis n'est plus respecté puisque la température à cœur au pic thermique est mesurée à 76,7°C.
 - Le pic thermique est observé en phase de prise du coulis lors de l'opération de blocage des déchets en panier, c'est-à-dire dans les 48 premières heures après coulée du coulis de blocage. Lorsqu'il y a peu de déchets en panier, ce pic se situe dans la zone de coulis sans déchet : Dans la zone de mélange déchets/coulis, d'une part, la proportion de coulis est moindre entraînant un effet exothermique moindre, et d'autre part, les déchets métalliques favorisent 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.
- Plus la quantité de déchets métalliques dans le panier est grande, plus la température à cœur dans la matrice cimentaire est basse et éloignée du seuil de 75°C à respecter : densité de flux moins importante (la puissance résiduelle est répartie dans un volume de déchet plus grand), on injecte moins de coulis exothermique dans le panier et l'évacuation de la chaleur par conductivité thermique à travers les déchets est plus importante. Ce résultat est le fruit de l'essai réalisé en 2016, dans les mêmes conditions que celui de 2015, mais mettant en œuvre une quantité de déchets inox avoisinant de 1990 kg. Dans une ambiance à 30°C et un coulis de blocage à 12°C, le pic de température à cœur dans le panier a été enregistré à 61°C, loin du seuil fixé à 75°C, montrant ainsi que pour une majorité de colis bien remplis en déchets métalliques sur ICEDA la question du risque de réaction sulfatique interne ne se pose pas.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 33/84

- 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 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.

Des essais représentatifs des conditions industrielles de mise en œuvre ont enfin été conduits en 2019 sur ICEDA, dans le cadre des essais d'ensemble portant sur la cellule de blocage : ces essais ont permis de procéder au blocage, sur une campagne journalière, de 5 paniers « enveloppe² », instrumentés en thermocouples, chacun rempli de 400 kg³ de déchets de crayons inox postiches (tels des crayons de barres de commande, 10 cm de long, 1 cm de diamètre) et également dotés de 5 résistances chauffantes à 170 W⁴ simulant la puissance thermique des déchets. Les résultats de cette campagne de blocage sont les suivants :

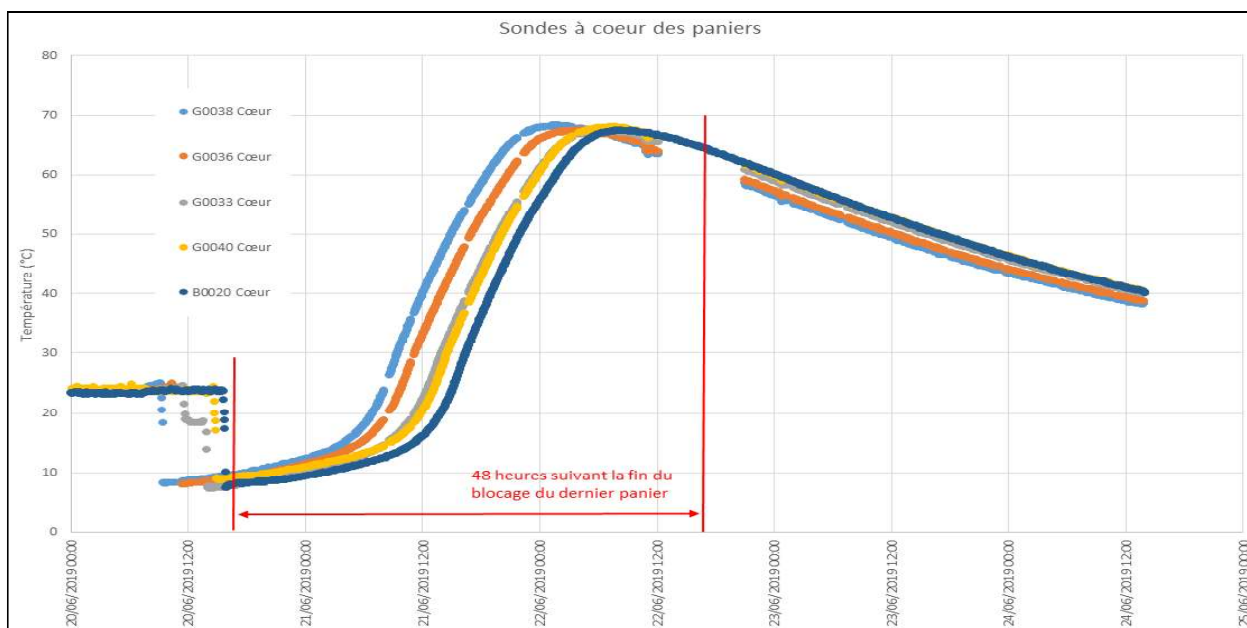
- Pour une température ambiante autour des paniers inférieure à 25°C (résultat du dispositif de ventilation du local), les températures constatées au pic thermique à cœur dans les paniers, en conditions industrielles de fonctionnement de la cellule de blocage sur ICEDA, sont restées globalement stables (ie. bonne répétabilité) puisque variant selon le panier entre 67,5 et 68,4°C, loin du critère de température à cœur de 75°C à respecter (cf. figure ci-dessous). Ces résultats mettent en évidence une marge de plus de 6°C par rapport au critère précédent. De plus, ces conditions « enveloppe » d'essais n'ont pas conduit au démarrage de la batterie froide additionnelle spécifique à la cellule de blocage qui constitue une réserve supplémentaire dans le cas où la ventilation courante du local ne suffirait plus à maintenir une température ambiante satisfaisante dans le local (cf. § 6.3.1.6).

² Le caractère pénalisant de ces paniers tient à la masse de 400 kg de déchets qu'ils contiennent, minimisant ainsi la dissipation de chaleur par conduction à travers le métal des déchets et maximisant le volume de coulis en présence et donc l'exothermie à la prise.

³ Cette valeur est la limite basse acceptable par colis telle que définie dans le domaine de fonctionnement d'ICEDA

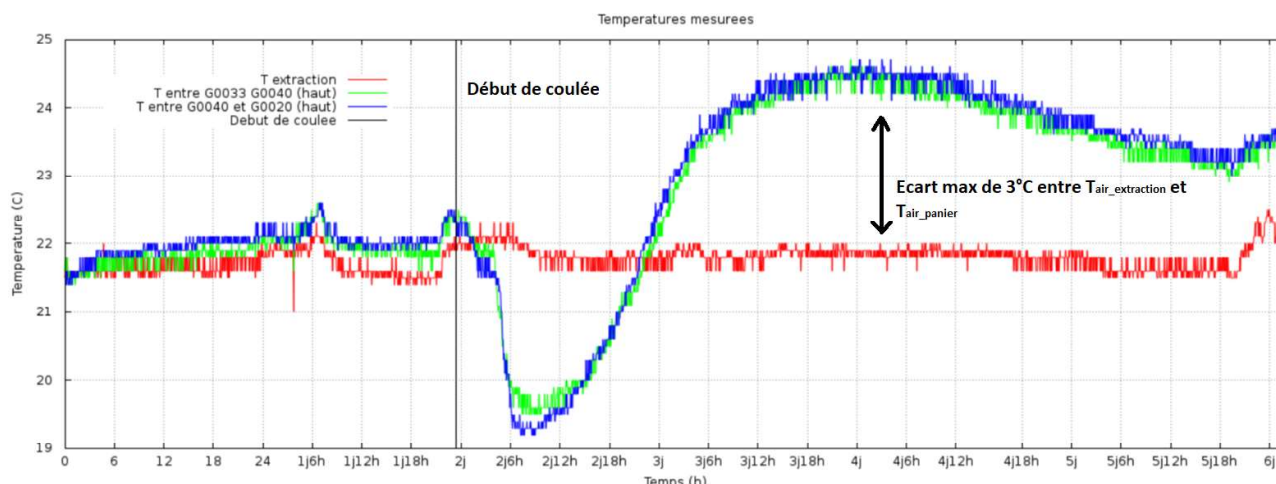
⁴ Cette valeur est la limite haute acceptable par colis telle que définie dans le domaine de fonctionnement d'ICEDA

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
	DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0




Mesures de température maximales à cœur du coulis lors de la campagne journalière d'essais de blocage de 5 paniers de déchets inox en 2019 ($T^{\circ}\text{coulis} < 10^{\circ}\text{C}$, $T^{\circ}\text{air prox panier} < 25^{\circ}\text{C}$, 400 kg de déchets et 170W par panier)

- La mesure de température ambiante à proximité des paniers n'étant disponible que dans le cadre des essais et ne pouvant correspondre à une mesure d'exploitation de la cellule, les essais ont permis d'évaluer l'écart entre la température de l'air dans l'environnement des paniers avec celle mesurée en exploitation dans la gaine d'extraction d'air de ventilation du local. L'écart maximal constaté au cours des essais est de 3°C.



Ecart maximal de température observé entre l'environnement des paniers (G0020, G0033 et G0040) et la gaine d'extraction d'air de la cellule de blocage (campagne d'essais de blocage de 2019)

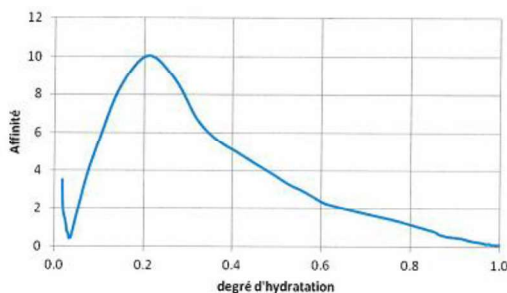
L'ensemble de ces essais thermiques a permis d'alimenter le modèle numérique mentionné au paragraphe 6.3.1.3 considérant les valeurs de conductivités thermiques correspondantes selon que les essais aient été menés avec des postiches de déchets en acier noir ou inox. La simulation des essais a fait l'objet d'une comparaison des calculs aux mesures de températures prises au cours des essais (cf. § 6.3.1.3).

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 35/84

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 à l'aide du Code SYRTHES version 5.0 en 2D axisymétrique (code de thermique aux éléments finis développé par EDF/R&D). Trois géométries ont été modélisées reprenant chaque phase opératoire : blocage, calage, bouchage.

Au-delà de la conduction dans les éléments constitutifs du colis, des pertes radiatives 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 :



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

avec :

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

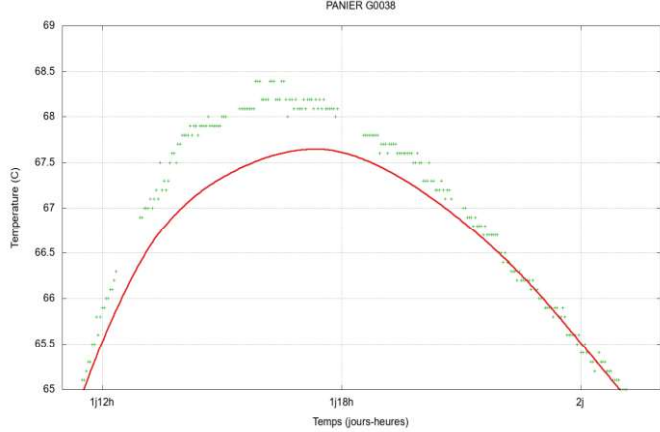
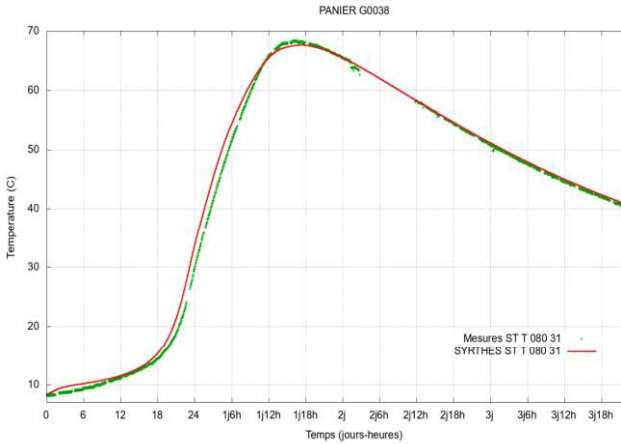
$Q_{hydra} = [] \text{ J/m}^3$ et l'avancement ou degré d'hydratation $E_a/R = [] \text{ Kelvin}$.

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. 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 en 2D par un modèle aux éléments finis à partir de la disposition des déchets dans le mélange, de la conduction thermique du coulis cimentaire et de celle de l'acier des déchets, considérant des tronçons de crayons de barres de commande de 10 cm de long et 1 cm de diamètre, en inox plein ou bien dotés d'une entretoise et d'un gainage en inox disposant d'un tube de pyrex pris en sandwich, considérant également tel que constaté lors des essais une répartition volumique de 50% de coulis et 50% de déchets globalement disposés horizontalement dans le panier. Son estimation varie autour de [] à [] W/m/K pour un mélange de coulis avec crayons pyrex et de [] W/m/K pour un mélange de coulis et de crayons inox pleins (ie. 2 valeurs car 2 composantes verticale et horizontale dans le mélange).

La cohérence des profils de température calculés dans les conditions des essais à l'échelle 1 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 particulier, les calculs réalisés sur la base des essais réalisés en 2019 sur ICEDA révèlent **un écart inférieur à 1°C entre le calcul et la mesure au pic thermique** en phase de prise du coulis de blocage des déchets en panier (cf. figures suivantes à titre illustratif).

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
	DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0

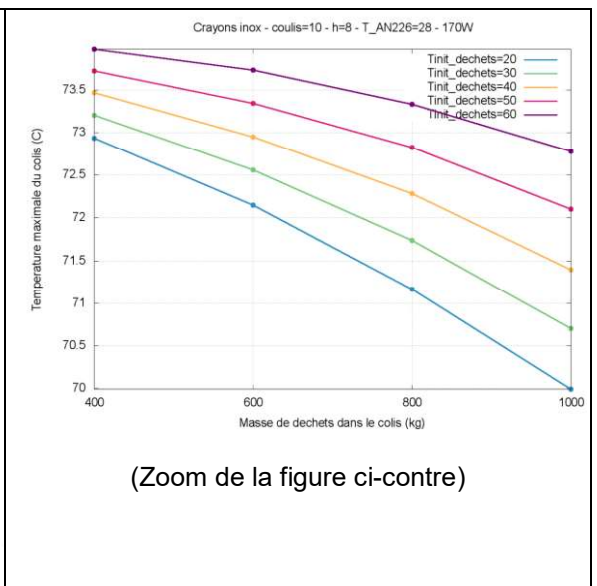
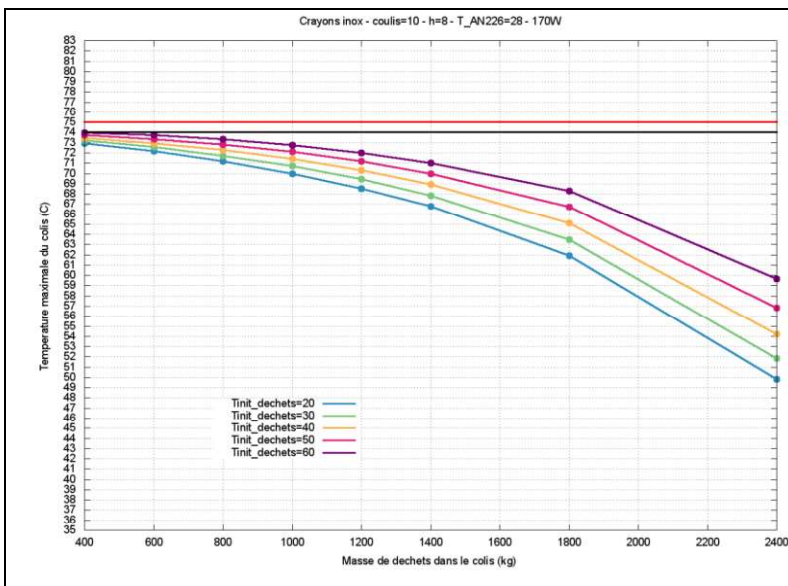


Comparaison calculs/mesures pour une sonde située dans le colis (zoom en figure de droite)

Ainsi, dans l'étude de sensibilité conduite à l'aide du modèle sur la température à cœur dans le colis de blocage, on cherche à vérifier malgré le cumul d'hypothèses pénalisantes, que la température maximale à cœur du colis de blocage fournie par le modèle est inférieure à la limite de 75°C évoquée au paragraphe 6.3.1.1 considérant, écart calculs/mesures compris, le respect par le calcul d'une valeur de 74°C.

Cette étude de sensibilité, réalisée sur la base d'une conductivité thermique d'acier inox ou inox/pyrex pour les déchets, inox pour le panier, démontre que 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.

Enfin, 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 une limite de température pour le coulis de blocage à 10°C à sa mise en œuvre et une limite de 28°C pour l'air ambiant autour de paniers garantissant une température à cœur du coulis toujours inférieure à 75°C, considérant comme évoqué ci-dessus une cible calculée à 74°C, durant toutes les phases de fabrication du colis.



(Zoom de la figure ci-contre)

Température maximale (°C) à cœur du coulis de blocage en fonction de la masse (kg) et de la température initiale des déchets (de 20°C à 60°C) (T° air prox panier 28°C, T°coulis 10°C, déchets à 170W)

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 37/84

Cette étude démontre l'influence de la quantité de déchets dans le panier : plus le panier contient de déchets plus la température à cœur dans le coulis s'éloigne du critère de 75°C à respecter.

Ces seuils sont traduits en conditions industrielles d'exploitation dans la conclusion ci-dessous en considérant (i) les incertitudes de mesures des capteurs équipant l'installation, (ii) l'écart maximal de 3°C relevé en cellule de blocage au cours des essais en conditions industrielles de 2019, entre la température par mesure d'exploitation dans la gaine d'extraction de l'air de la cellule et celle instrumentée pour les essais dans l'environnement des paniers.

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 16 W/m/K. Cette démarche pénalisante est celle sur laquelle se basent les résultats présentés ci-après.

Considérant la situation la plus pénalisante possible soit,

- un colis « enveloppe » de 400 kg de déchets à 400 TBq équivalent ⁶⁰Co,
- une puissance des déchets inox avec ou sans pyrex de 170 W,

	<p align="center">RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE</p>		
<p>DP2D_FD-DP2D</p>	<p>Référence : D455524009198</p>	<p>Indice : 0</p>	<p>Page 38/84</p>

- un panier dans une ambiance à 28°C,
- un coulis à 10°C à sa mise en œuvre,
- Une température initiale des déchets de 50°C,

Les résultats 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. Ces températures sont sensiblement égales autour de 73,7°C à une décimale près, inférieures à 74°C, pour une quantité faible de 400 kg de déchets par panier. Pour des masses de déchets plus importantes, la température au pic thermique à cœur d'un panier avec déchets pyrex est inférieure à celle dans un panier de déchets inox : en effet, la densité des déchets pyrex étant plus faible, à masse équivalente, ces déchets occupent un volume plus important dans le panier minimisant ainsi le volume de coulis et donc la chaleur dissipée par ce coulis à la prise.

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 est respecté.

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. En consigne d'exploitation, cette exigence est traduite par un critère de température de coulis mesurée inférieure ou égale 9,4°C, pour tenir compte de l'incertitude de mesure, dans la conduite d'acheminement du coulis en amont de la vanne de distribution dans le local de blocage.
- La température ambiante dans le local de blocage des déchets est inférieure à 28°C. En consigne d'exploitation, cette exigence est traduite par une température mesurée dans la gaine d'extraction de l'air du local de blocage inférieure à 24°C, incertitude de mesure comprise.
- 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 consignes 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. Les moyens matériels installés sur ICEDA pour respecter ces consignes d'exploitation sont les suivants :

- Un échangeur fonctionnant en circuit fermé refroidit le coulis en sortie de malaxeur jusqu'au critère de température à respecter. Le coulis est ensuite orienté vers la cellule de blocage des déchets pour être mis en œuvre par coulée gravitaire dans chaque panier, à travers les déchets.
- La cellule de blocage des déchets est dotée d'un dispositif de ventilation commun aux cellules de l'installation.
- La cellule de blocage des déchets est équipée en complément d'un groupe froid permettant un refroidissement complémentaire de l'air de soufflage si besoin.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 39/84

6.3.2 Comportement thermique des colis en phase d'entreposage

La ventilation a vocation à évacuer les calories relatives à la puissance thermique résiduelle des colis bien qu'elle ne régule pas directement la thermique des halls : il n'existe pas de rétroaction entre l'ambiance thermique des halls et la quantité d'air introduite par la ventilation. Dans la même logique, la ventilation n'a pas vocation à réguler l'hygrométrie, bien qu'elle ait un impact sur les niveaux d'humidité relative dans les halls, via l'apport d'air aux conditions de température et d'hygrométrie extérieures.

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.

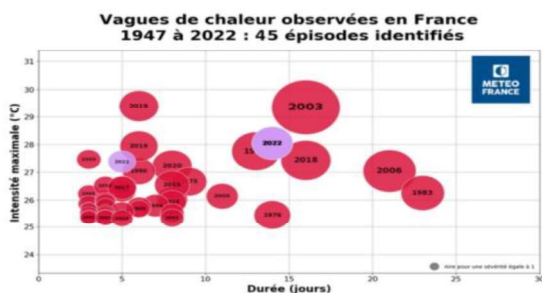
La température interne des colis en hall d'entreposage est essentiellement fonction :

- de la puissance résiduelle des déchets activés contenus dans chaque colis, ainsi que du nombre total de colis par hall et de fait de la puissance résiduelle cumulée de l'ensemble des colis en présence.
- des conditions de température et de ventilation dans le hall et donc de l'air ambiant à l'extérieur du hall.
- dans une moindre mesure, du positionnement des colis dans l'empilement.

6.3.2.2 Modèle couplé de comportement aéraulique et thermique du hall et des colis MAVL ICEDA

Considérant les données de dimensionnement d'un hall d'ICEDA, les caractéristiques du dispositif de ventilation et d'extraction de l'air et la disposition de près de 1100 colis disposés de manière pyramidale, en quinconce, sur 3 niveaux, portant une puissance thermique totale limitée à 80 kW dans le domaine de fonctionnement d'ICEDA, un modèle 3D couplé, aux éléments finis, a été développé pour simuler les mouvements d'air dans le hall et à travers l'empilement ainsi que les échanges thermiques par conduction, convection et rayonnement entre et autour des colis et du génie civil du hall. Le modèle tient compte de la décroissance radiologique et donc thermique des colis au cours d'un remplissage total du hall étalé sur 30 ans. Il considère enfin les échanges thermiques avec l'atmosphère (température, nébulosité, flux solaire, pertes nocturnes).

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 40/84

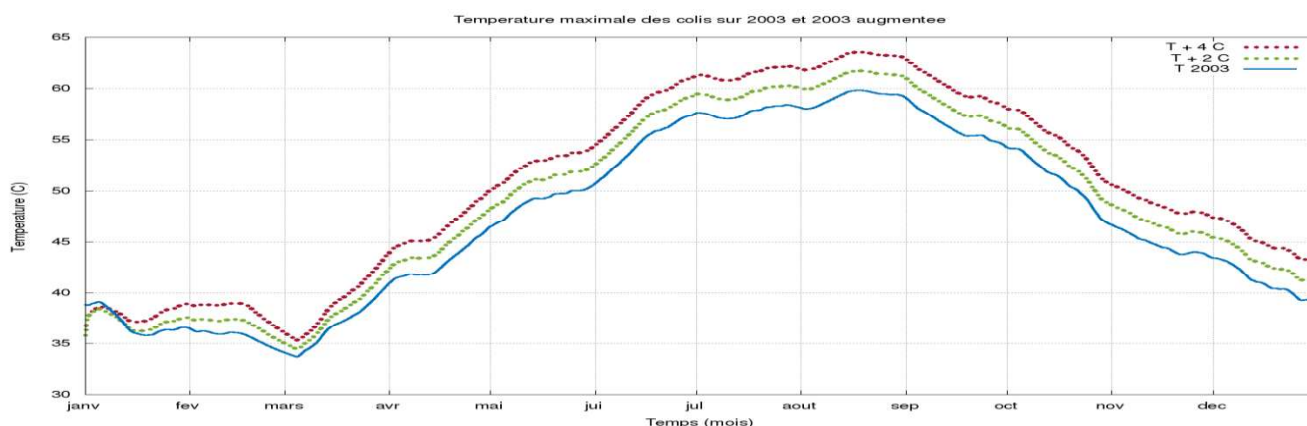


Pour cela, il s'appuie sur les données météorologiques disponibles pour le CNPE du Bugey pour les années 1999 à 2012 avec un focus particulier sur l'année 2003 dont l'été a été le plus chaud observé depuis 1950 (données Météo France) et jusqu'à date, avec une canicule exceptionnelle par sa durée et son intensité. Météo France considère l'année 2003 comme l'année de la canicule de référence.

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

La modélisation telle que décrite permet en régime stationnaire de s'assurer que la température moyenne de l'air dans le hall est représentative de la température de l'air au droit de la gaine d'extraction et que cette dernière est homogène sur toute la section de sortie de la gaine. La limite de l'approche du régime permanent est qu'il n'est pas réaliste de considérer une température ambiante extérieure d'air constante en fonction du temps qui ne tiendrait donc pas compte des variations jour/nuit et des variations saisonnières. Le caractère inertiel des volumes de béton en présence (ie. génie civil du hall, colis) joue un rôle essentiel dans l'évolution de la température à cœur des colis.

En régime instationnaire, considérant de manière pénalisante et réaliste les données météorologiques temporelles de l'année 2003 en entrée d'une modélisation couplée équivalente à la précédente (mais considérant un modèle fluide 0D d'aérodynamique pour des considérations de temps de calculs), plusieurs résultats de température à cœur du coulis de blocage sont présentés (cf. figure ci-dessous) en considérant l'année 2003 (en bleu) mais également un potentiel réchauffement climatique de +2°C (en vert) et +4°C (en rouge) pour une masse de déchets de 400 kg par panier :



- En conséquence de la période caniculaire (plus de 10 jours de températures très élevées et une température moyenne de 27°C telles que mesurées lors de la canicule du 3 au 13 août 2003), la température maximale atteinte à cœur des colis les plus pénalisants radiologiquement et en masse (on considère l'hypothèse fictive et pénalisante selon laquelle 100% des colis ne contiennent que 400 kg de déchets) reste inférieure à 60°C pour un critère à respecter de 65°C.
- Une étude considérant une rehausse de +2°C ou +4°C de toutes les données de température de l'année 2003 a également été menée. Les résultats de l'étude montrent que l'augmentation en conséquence de la température maximale dans les colis est proportionnelle à cette augmentation « forcée » de la température

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 41/84

extérieure. Le critère de 65°C à cœur des colis reste, de fait, respecté même pour un hypothétique réchauffement des températures moyennes de 4°C appliqué à l'année ayant présenté l'été le plus chaud enregistré à ce jour.

Enfin des résultats de l'étude basés sur une situation fictive selon laquelle les températures caniculaires de 2003 se prolongeraient indéfiniment dans le temps, démontrent que la température à cœur des colis resterait sous le critère de 65°C durant plusieurs mois, y-compris dans l'hypothèse fictive et pénalisante selon laquelle 100% des colis ne contiennent que 400 kg de déchets (précisément le calcul considère le moment de l'année 2003 où les colis atteignent leur température maximale à cœur et applique à partir de ce moment, de manière cyclique, les conditions d'ensoleillement et de température de la journée de canicule la plus chaude d'août 2003).

En conclusion, le critère de 65°C à cœur des colis en situation d'entreposage d'un hall ventilé, rempli de colis pour une puissance résiduelle à 80 kW en limite du domaine de fonctionnement d'ICEDA, est respecté y-compris si l'on considère des hypothèses pénalisantes et pour certaines irréalistes à savoir (i) 100% des colis dans le hall ne contiennent que 400 kg de déchets, (ii) 100% des colis ont une puissance résiduelle de 170 W à leur entrée dans le hall, (iii) les données météorologiques locales du CNPE du Bugey considérées par l'étude sont celles de l'année de la canicule de référence de 2003 augmentées de +2°C et +4°C. Le caractère de forte inertie thermique des bétons du génie civil et des colis explique ces résultats.

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

En régime instationnaire relatif à la perte de ventilation dans le hall d'entreposage, l'étude propose des calculs transitoires sur la base des mêmes données météorologiques locales du site du Bugey au cours de l'année 2003 en considérant de manière pénalisante, (i) une perte de ventilation au début de la période chaude (1^{er} juillet), ou (ii) au moment où les colis sont les plus chauds (début août) en supposant que la période de canicule se poursuit fictivement sur plusieurs mois. Les résultats obtenus sont les suivants :

- Si la ventilation s'arrêtait au 1er juillet, les colis tous remplis par hypothèse à 730 kg de déchets métalliques (ce qui reste faible) auraient pu passer tout l'été dans le hall sans atteindre 75°C : ils auraient alors atteint 74.2°C à cœur dans la configuration la plus pénalisante. En revanche, s'ils n'étaient tous remplis que de 400 kg de déchets métalliques (cette situation qui considère que 100% des colis ne contiennent que 400 kg de déchets est fictive et pénalisante), ils auraient atteint 76.8°C vers le début du mois de septembre, laissant ainsi un délai de 2 mois pour remettre en service le système de ventilation ou tout autre dispositif transitoire.
- Si la ventilation s'arrête au moment où les colis sont les plus chauds et que la période de canicule se poursuit fictivement sur plusieurs mois, les calculs montrent, dans le cas pénalisant de l'ensemble des colis à 400 kg de déchets métalliques, que le critère de température de 75°C à ne pas dépasser dans cette situation est atteint après 42 jours (considérant de manière pénalisante une faible convection naturelle dans le hall).

Pour des colis à 730 kg (resp. 1460 kg) de déchets métalliques, le critère de température de 75°C serait dépassé après 55 jours (resp. 61 jours). Une remise en service de la ventilation serait permise compte tenu des délais confortables mentionnés pour remédier à cette panne, d'autant que la canicule de 2003 n'a duré que 10 jours alors que l'hypothèse enveloppe à la base de ces résultats de calcul est liée à la persistance de cette canicule sur plusieurs mois.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 42/84

6.3.3 Conclusion

En fonctionnement normal relatif à un hall d'entreposage ventilé rempli de colis, considérant une puissance de 80 kW portée par l'empilement des colis et dans l'hypothèse irréaliste et pénalisante selon laquelle 100% des colis entreraient à 170 W dans le hall et ne contiendraient que 400 kg de déchets métalliques chacun, considérant enfin les données météorologiques estivales réalistes et pénalisantes de l'année caniculaire de 2003 (année caniculaire de référence à date selon Météo France), les résultats de température à cœur inférieurs à 60°C dans les colis respectent le critère de 65°C permettant de prévenir le risque de réaction sulfatique interne.

Cette température demeurerait inférieure à 62°C (resp. 64°C) dans l'hypothèse d'une augmentation fictive de +2°C (resp. +4°C) de toutes les données météorologiques en température disponibles sur l'année 2003. Elle demeurerait également inférieure à 64°C dans l'hypothèse où une canicule équivalente à celle observée du 3 au 13 août 2003 se prolongerait indéfiniment.

Ces résultats « pénalisants » vis-à-vis d'une situation réaliste d'un hall plein disposant de colis en majorité optimisés en matière de remplissage et d'une puissance résiduelle inférieure à 80 kW, permettent de conclure sur **l'absence de besoin de fixer un paramètre garanti associé à un critère à surveiller concernant la température de l'air à l'extraction du hall pour maîtriser la température à cœur de 65°C dans les colis.** Cette approche n'est d'ailleurs pas physiquement envisageable car elle ne permet pas de considérer l'inertie thermique des bétons (génie civil du hall et colis) en présence dont l'importance est majeure sur le comportement thermique à cœur des colis. C'est la raison pour laquelle la température de l'air à l'extraction de chaque hall, qui fait l'objet d'une mesure enregistrée, est intégrée en pièce 1 du Référentiel au titre des paramètres complémentaires [23].

Dans le cas d'une perte de la ventilation dans les halls, les résultats des calculs transitoires « enveloppe » considérant deux situations pénalisantes de dysfonctionnement dans les conditions de la canicule de l'été 2003 démontrent que l'exploitant disposerait a minima d'une période de 6 semaines pour remettre en service le système de ventilation ou tout autre dispositif transitoire dans le but de respecter le critère de température à cœur de 75°C dans les colis.

6.4 CORROSION DES DECHETS ACTIVES DANS LE COLIS

Les colis C1PG^{SP} produits à ICEDA pourront contenir divers alliages métalliques en proportions variables, en fonction de la nature des déchets : Acier inoxydable, Argent Indium Cadmium (AIC), zircaloy, tantale, etc. La corrosion de ces alliages en milieu cimentaire constitue une source de production d'hydrogène à estimer, cette source pouvant d'une part impacter la production d'hydrogène de radiolyse par recombinaison (cf. § 6.5), d'autre part exercer une influence sur la tenue mécanique du colis en terme de pression interne. La quantité d'hydrogène produite par la corrosion de ces déchets métalliques est en conséquence évaluée dans la suite, de manière conservative, dans des conditions thermiques et chimiques (colis cimentaire) représentatives d'un colis.

6.4.1 Détermination expérimentale des vitesses de corrosion

Des essais en autoclave réalisés par l'Université de Grenoble Alpes déterminent les vitesses de corrosion :

- Essai sur poudre d'acier inoxydable austénitique 304L : cette nuance fait partie des alliages les plus présents dans l'inventaire des déchets MAVL d'EDF. Elle est aussi plus sensible à la corrosion que la nuance 316.

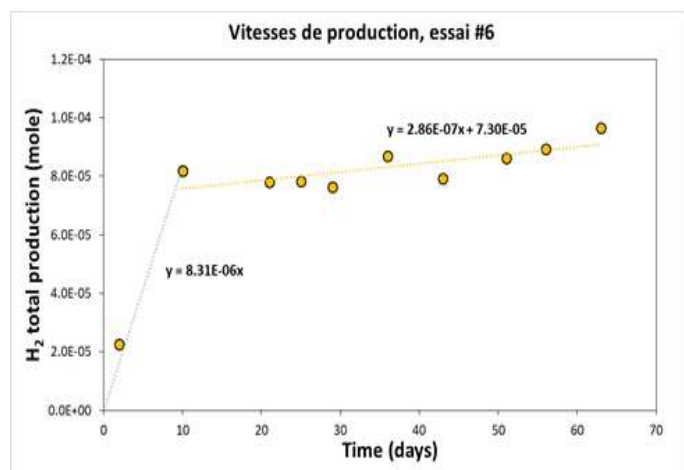
	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 43/84

- Essais sur barreau d'un alliage d'AIC recomposé afin qu'il soit représentatif⁵ sur le plan chimique d'un alliage d'AIC après fonctionnement en réacteur nucléaire (ie. alliage quaternaire argent-indium-cadmium-étain).

Les autres alliages composant l'inventaire des déchets tels que le zircaloy, 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. Les vitesses de corrosion définies ci-après pour l'acier inox et l'AIC sont en conséquence considérées comme plus pénalisantes pour évaluer la production d'hydrogène de corrosion des déchets dans les colis.

Les conditions expérimentales d'essais correspondent aux phases d'entreposage des colis à ICEDA et d'exploitation et de stockage réversible à Cigéo, à savoir un pH de 13,5 (ie. essais conduits en solution de soude), des conditions anoxiques, et une température maximale enveloppe de 65 °C à cœur des colis.

6.4.1.1 Vitesse de production d'H₂ liée à la corrosion de l'acier inoxydable



Les points expérimentaux acquis pour l'acier inoxydable 304L présentent une vitesse initiale de corrosion à croissance rapide sur les 10 premiers jours, entraînant une production forte d'hydrogène.

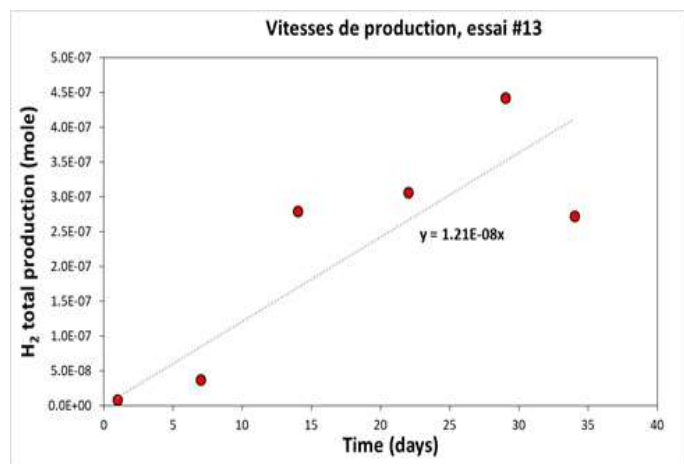
Au-delà, vitesse de corrosion et production d'hydrogène suivent une croissance plus lente selon une asymptote oblique relative à une vitesse de corrosion dite résiduelle qui fixe l'estimation de la production d'hydrogène dans les colis en phase d'entreposage à ICEDA puis en phase de stockage à CIGEO.

(Essai sur poudre d'acier inox 304L, solution de soude)

⁵ A l'état neuf, la microstructure de l'AIC est une solution solide de structure cristalline cubique à faces centrées. Sous irradiation, l'AIC subit des transmutations : Ag → Cd, In → Sn. Par transmutation de l'indium en étain, l'alliage devient quaternaire Ag-In-Cd-Sn et sa microstructure évolue : une phase hexagonale compacte apparaît au sein de la phase cubique à faces centrées. Les expertises réalisées par EDF sur des échantillons d'AIC irradié révèlent des échantillons monophasés à structure hexagonale compacte en périphérie, sur une épaisseur allant de 250 µm à 1 mm.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
	DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0

6.4.1.2 Vitesse de production d'H₂ liée à la corrosion de l'AIC « vieilli »



La disposition des points expérimentaux acquis pour l'AIC « vieilli » ne conduit pas de manière évidente à retenir une vitesse initiale puis une vitesse résiduelle de corrosion comme pour l'acier inox. Elle conduit à retenir une approche plus conservatrice considérant une vitesse moyenne croissante lissée sur tous les points expérimentaux acquis, indépendamment de l'existence ou non d'une couche de corrosion protectrice formée en surface.

(Essai sur barreau d'AIC vieilli, en solution de soude)

A noter, une production d'hydrogène plus faible dans le cas de l'AIC compte tenu du fait que l'essai ait eu lieu sur barreau et non sur poudre donc pour des surfaces spécifiques exposées très différentes.


6.4.2 Estimation du débit annuel de production d'hydrogène de corrosion

Pour la cohérence de l'étude associant les effets de la radiolyse, de la corrosion des déchets et du séchage du béton sur la mécanique du colis, les vitesses de corrosion déterminées expérimentalement ci-avant sont associées, aux configurations de colis décrites en données d'entrée de l'étude de radiolyse (cf. 6.5.1), à savoir : deux masses de déchets (400 et 1990 kg par colis), deux types de déchets activés (crayons inox et crayons absorbants AIC) et les géométries des crayons des paliers 900 et 1300 MW⁶. Ces données permettent d'estimer les surfaces d'alliages exposées à la corrosion et, en conséquence la quantité d'hydrogène produite.

Par ailleurs, de manière conservatrice, même si les jeux d'insertion sont faibles entre la gaine inox et le crayon AIC d'une part, la gaine inox et le crayon inox à cœur d'autre part, les surfaces considérées comme exposées à la corrosion correspondent aux surfaces externes et internes des gaines inox, à la surface externe de l'AIC, à la surface externe du crayon inox plein du palier 900 W, aux surfaces internes et externes du tube inox à cœur du crayon inox du palier 1300 MW. Ces hypothèses couvrent les surfaces spécifiques potentiellement soumises à la corrosion de déchets activés de démantèlement qui correspondent à des déchets bien plus massifs : le choix d'axer l'étude de corrosion sur des crayons activés de barre de commande par rapport aux déchets de démantèlement est largement le plus pénalisant.

Sur la base de ces hypothèses et données d'entrée, en particulier on le rappelle sur la base de vitesses de corrosion obtenues dans des conditions représentatives pénalisantes des déchets conditionnés en colis sur ICEDA (pH basique en milieu soude, température à 65°C), les résultats enveloppe de production d'hydrogène de corrosion des déchets en colis sont les suivants :

⁶ Le concept géométrique des crayons AIC est semblable pour les 2 paliers, le crayon inox du palier 900 MW ayant une gaine et un cylindre plein à cœur contre une gaine et un tube creux sur le 1300 MW

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
	DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0

CRAYONS ABSORBANTS AIC					CRAYONS INOX		
			900 MW	1300 MW	900 MW	1300 MW	
Colis 400 kg	S _{totale} gaine inox	m ²	[]	[]	[]	[]	S _{totale} inox
	Débit d'H ₂ gaine inox	L/an	[]	[]			
	S _{totale} AIC	m ²	[]	[]			
	Débit d'H ₂ AIC	L/an	[]	[]			
	Débit d'H₂ total	L/an		[]	[]	[]	[]
Colis 1990 kg	S _{totale} gaine inox	m ²	[]	[]	[]	[]	S _{totale} inox
	Débit d'H ₂ gaine inox	L/an	[]	[]			
	S _{totale} AIC	m ²	[]	[]			
	Débit d'H ₂ AIC	L/an	[]	[]			
	Débit d'H₂ total	L/an		[]	[]	[]	[]

En définitive, de par l'approche conservatrice retenue dans le choix d'une vitesse moyenne de corrosion de l'AIC « vieilli », les crayons AIC, en particulier ceux du palier 900 MW, sont ceux pour lesquels l'estimation de production d'hydrogène de corrosion est la plus forte, inférieure à 10 litres/an pour un colis bien rempli à près de deux tonnes de déchets, inférieure à 2 litres/an pour un colis en limite basse en masse de déchets par colis, soit 400 kg telle que définie dans le domaine de fonctionnement d'ICEDA.

Ces deux valeurs sont considérées dans les résultats présentés au paragraphe 6.5 pour l'estimation du débit d'hydrogène de radiolyse dans les colis.

6.5 RADIOLYSE

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 « thermiques ». 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.

La présence d'un terme source complémentaire d'hydrogène lié à la corrosion des déchets métalliques activés dans le colis est prise en compte (cf. § 6.4) dans l'évaluation du terme source d'hydrogène de radiolyse afin de considérer les phénomènes de recombinaison possible de l'hydrogène avec l'eau libre en présence dans la porosité des matrices cimentaires constitutives du colis.

Ces productions nécessitent d'évaluer les quantités de gaz relâchées, en particulier en situation de stockage. Elles peuvent 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 produit 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.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 46/84

Ces termes source de production d'hydrogène de corrosion et de radiolyse participent à la démonstration de l'intégrité mécanique du colis en complément de l'étude conduite 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. A partir de ce terme source de production d'hydrogène, des contraintes mécaniques sont calculées et permettent d'évaluer la tenue mécanique des colis sous l'effet des gaz de radiolyse et de corrosion (en tenant compte des phénomènes de séchage, cf. § 6.7.2). Enfin, l'application des lois de transport associées aux propriétés des matrices cimentaires constitutives du colis démontre la capacité de celui-ci à évacuer ces gaz.

L'étude n'intègre pas l'effet de la radiolyse des adjuvants introduits dans ces matrices cimentaires bien que des expérimentations aient été conduites depuis 2010 au CEA sur le comportement sous irradiation des superplastifiants de nouvelle génération (cf. projets SUPERRAD 1 et 2 cofinancés par EDF). Ces travaux scientifiques, reposant sur les essais expérimentaux complexes et toujours en cours, 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.

L'étude n'intègre pas non plus l'effet de la présence de soufre sur la production d'hydrogène du fait du choix d'un ciment de type CEM I.

Concernant l'influence de la présence de fer⁷ sur la radiolyse, l'expérience phénoménologique 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. Ces essais ont montré que l'ajout de 1% de FeOOH induit la formation d'environ 26% de H₂ supplémentaire. Ces valeurs significatives ont depuis conduit à une mise à jour des modèles de radiolyse utilisés pour permettre sa bonne prise en compte.

Cette expérience a par ailleurs 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. Ainsi, seule la production de dihydrogène par radiolyse de l'eau porale 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.

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.

⁷ Selon le CEA, le fer est présent en tant qu'impureté dans le coulis cimentaire (par le biais du ciment qui conduit à la formation d'alumino-ferrite C4AF (4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃) et dont l'hydratation conduit à générer du fer ferrique Fe(III). Cela peut conduire à la formation de différents minéraux où le fer est en solution solide (mono-sulfoaluminate, mono-carboaluminate de calcium et dans une moindre mesure hydrogénéat et ettringite). La présence d'oxydes ou d'hydroxydes de fer dans les granulats peut être également une source de fer dans le coulis.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 47/84

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 « thermiques ».

6.5.1 Configurations enveloppes et pénalisantes de colis de déchets

6.5.1.1 Les déchets représentatifs « enveloppe »

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 matières de radiolyse et de corrosion.

6.5.1.2 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 court terme puis une période à plus long terme selon les radionucléides β/γ « thermiques » associés. Ces configurations sont les suivantes :

- Une configuration pénalisante à plus court terme, basée sur un colis disposant d'une faible quantité de déchets métalliques de crayons de grappes de commande (400 kg) et dont l'activité radiologique est à la limite haute du domaine de fonctionnement d'ICEDA, soit 400 TBq/colis en émetteurs β/γ « thermiques », en présence de ^{60}Co uniquement ou bien d'un mix $^{60}\text{Co} / ^{108\text{m}}\text{Ag}$ (cf. ratio⁸ $^{60}\text{Co} / ^{108\text{m}}\text{Ag}$ de [], cf. [3]). Cette quantité faible de déchets accroît le volume de coulis cimentaire de blocage et donc d'eau libre en présence, conduit localement à un débit de dose important, et maximise ce dernier à court terme si un inventaire plus riche en ^{60}Co est considéré.
- Une seconde configuration pénalisante à plus long terme, basée sur 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 « thermiques » 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 $^{60}\text{Co} / ^{108\text{m}}\text{Ag}$ de [], cf. [3]). Dans un tel cas, la présence en masse plus importante d' $^{108\text{m}}\text{Ag}$ à vie longue maintient un niveau d'activité radiologique plus important dans le temps et occasionne une production

⁸ Ratio $^{60}\text{Co} / ^{108\text{m}}\text{Ag}$ 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 MW. La valeur de ce ratio dépend de la masse de déchets par colis.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 48/84

d'hydrogène plus soutenue sur le long terme (à comparer à un colis à faible quantité de déchets avec mix ^{60}Co et $^{108\text{m}}\text{Ag}$ qui en conséquence détient moins d' $^{108\text{m}}\text{Ag}$).

6.5.1.3 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 des phénomènes de radiolyse et de corrosion,
- Évaluation de la production d'hydrogène de radiolyse, tenant compte de la production d'hydrogène de corrosion, à partir des résultats de débit de dose pour différentes valeurs de saturation en eau dans les matériaux cimentaires ;
- Évaluation de l'impact de l'hydrogène de radiolyse et de corrosion mais également de la dessiccation des matériaux cimentaires sur le comportement mécanique du colis, analyse de la capacité du colis à évacuer ce gaz.

Cette démarche ne suit pas un processus itératif dans lequel tous les codes de calculs seraient directement chaînés : les calculs de débit de dose sur le coulis cimentaire ou le béton enveloppe sont réalisés lors d'une première étape et sont donc découplés de l'estimation du débit d'hydrogène de radiolyse.

A partir de ces débits de dose, un grand nombre de calculs de radiolyse, couplés aux calculs de production d'hydrogène de corrosion, sont réalisés à différents états de saturation du coulis, permettant la constitution d'une bibliothèque de valeurs de flux d'hydrogène en fonction de la saturation et du temps. Cette bibliothèque permet ensuite, lors de la réalisation du calcul de tenue mécanique, de tenir compte d'un terme source d'hydrogène de radiolyse et de corrosion variable en fonction de la décroissance radioactive mais aussi de l'état de saturation calculée par les modélisations THM.

Enfin, rappelons que lors de la première étape, les résultats d'évaluation du 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.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 49/84

6.5.1.4 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 le critère de température à cœur maximum acceptable de 65°C vis-à-vis de la maîtrise de la réaction sulfatique interne).

- Evaluation de la production d'hydrogène :

Concernant le modèle de radiolyse DO-RE-MI du CEA, l'influence de la température et du taux de saturation dans les matrices cimentaires sur les rendements primaires à pH donné et les constantes cinétiques a été intégrée ces dernières années par le CEA pour estimer la production d'hydrogène dans des conditions adaptées à celles des colis en situation d'entreposage sur ICEDA ou de stockage à CIGEO. Ainsi, l'effet de la température à cœur du colis sur l'évaluation de la pression d'hydrogène a été pris en compte en réalisant le calcul de radiolyse à 61°C. De même la courbe expérimentale de succion du coulis de blocage des déchets déterminée par EDF a été intégrée dans le modèle pour tenir compte de l'influence du séchage dans l'estimation de la production d'hydrogène. Cette approche est à date la meilleure considérant l'état des connaissances disponibles du modèle DO-RE-MI. La courbe de succion/désorption est obtenue expérimentalement à 60°C. Concernant la quantité d'hydrogène produite par corrosion sur les déchets métalliques en présence dans le colis, son évaluation s'appuie sur des vitesses de corrosion issues d'essais conduits en autoclave à 65°C (cf. § 6.4.1).

- Evaluation de la tenue mécanique du colis sous l'effet de la radiolyse, de la corrosion des déchets métalliques 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^{SP} MAVL ICEDA réalisée avec Code_Aster (code aux éléments finis dédié à la mécanique et développé par EDF R&D) tient compte des conditions de température à cœur et autour du colis, en supposant des températures constantes et pénalisantes. 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 couplée THM permet de tenir 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 homogène et fixe dans tout le coulis sur la durée de simulation impliquent qu'aucune dilatation entre le début et la fin de la simulation n'est à même de générer des contraintes additionnelles (ie. pas de variation de température). En revanche, dans le béton qui constitue l'enveloppe externe du colis (ie. conteneur et bouchon), compte tenu du gradient de température imposé dans l'épaisseur du béton par les conditions aux limites (48°C en peau de colis, 62°C à cœur dans le coulis), ces mécanismes sont bien effectifs.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 50/84

6.5.1.5 Perméabilité du béton enveloppe du colis (conteneur + bouchon)

La perméabilité 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 du béton retenue dans notre étude est désormais une valeur expérimentale déterminée sur le béton utilisé pour le conteneur C1PG^{SP} et son bouchon : elle est de $4,5 \times 10^{-22} \text{ m}^2$ contre une valeur de $3,0 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ utilisée dans les études précédentes et tirée de la bibliographie (cf. [3]).

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 $1,0 \times 10^{-22} \text{ m}^2$, lorsque les conditions aux limites en surface ne tiennent pas compte de la partie convective, ce qui est le cas dans nos modélisations.

La valeur de $4,5 \times 10^{-22} \text{ m}^2$ confirme que le béton du colis C1PG^{SP} présente 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%.

Cette valeur est issue d'un programme expérimental engagé par EDF visant à déterminer ou préciser différentes caractéristiques du béton du colis C1PG^{SP} dont, indirectement par recalage à partir d'essais de séchage, la perméabilité du béton. Ce résultat permet de conforter la valeur de $3,0 \times 10^{-22} \text{ m}^2$ utilisée jusque-là dans les études.

La présente note propose dans la suite une mise à jour des résultats des études sur la radiolyse mais également sur le séchage du béton du colis et ses conséquences mécaniques à partir de cette dernière valeur expérimentale de perméabilité, des propriétés de succion du coulis et des derniers développements dans DO-RE-MI. Elle propose par ailleurs une mise à jour de l'étude de sensibilité autour de la perméabilité conformément à la recommandation ASN n°5 et la Position/action correspondante (cf. [42]).

6.5.1.6 Influence du pH

La chimie du milieu, et donc le pH, sont pris en compte dans le modèle de radiolyse (DO-RE-MI) du CEA. Les résultats des simulations indiquent par ailleurs que le pH initial du liquide poral de 13,2 reste globalement stable sur la durée du calcul d'environ 150 ans.

6.5.2 Evaluation du débit de dose dans les colis

Le code DARWIN v2.3 permet à partir de l'activité radiologique d'un jeu de radionucléides de calculer leur décroissance radiologique dans le temps. En sortie, les spectres β/γ sont déterminés à l'instant initial « To » de fabrication du colis, ainsi qu'à des instants ultérieurs par exemple, en fin de phase d'entreposage dans ICEDA (ie. à réception des colis à CIGEO) ou bien SA en fin de période d'exploitation réversible du stockage des colis dans CIGEO.

Pour l'estimation des débits de dose dans le colis MAVL d'ICEDA, DARWIN v2.3 utilise la bibliothèque de données nucléaires JEFF-3.1.1.

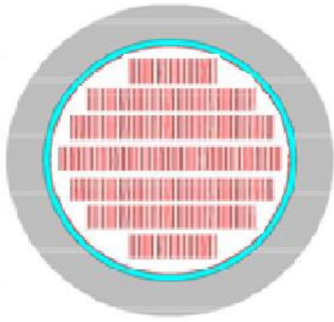
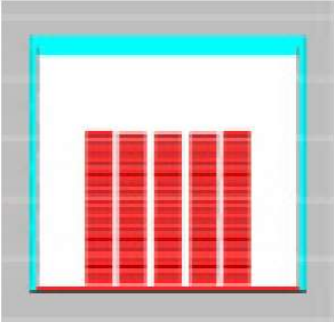
Le code TRIPOLI v4.10 associé à la bibliothèque GALILEE-V0-3.0 du CEA est utilisé pour estimer, à partir des spectres des sources β/γ (^{60}Co et $^{108\text{m}}\text{Ag}/^{108}\text{Ag}$) calculés avec DARWIN, les débits de dose dans le coulis cimentaire bloquant les déchets et dans le béton constituant 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 le positionnement aléatoire peu prédictible de crayons disposés en vrac dans un panier.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
	DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0

La modélisation choisie représente les morceaux de crayons dans un réseau carré régulier considérant, de manière pénalisante, 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. Cette configuration est également pénalisante dans l'évaluation du débit de dose dans le coulis cimentaire en regard par exemple d'une configuration qui présenterait un déchet massif de volume équivalent au volume total des crayons. 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 « thermiques » en présence (^{60}Co ou mix $^{60}\text{Co}/^{108\text{m}}\text{Ag}$).

Les deux configurations suivantes, qui correspondent aux deux configurations précédemment décrites (400 kg de déchets, pénalisant à court terme, et 1990 kg de déchets, pénalisant à plus long terme) 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.

 <p>Configuration de référence dite « enveloppe sur le court terme » du colis</p> <p><i>(400 kg de déchets, 400 TBq/colis en β/γ « thermiques », tronçons de 10,9 cm, entraxe 1 cm entre crayons)</i></p>	<p>Erreur ! Des objets ne peuvent pas être créés à partir des codes de champs de mise en forme.</p>  <p>Configuration de référence dite « enveloppe sur le long terme » du colis</p> <p><i>(1990 kg de déchets, 400 TBq/colis en β/γ « thermiques », présence d'$^{108\text{m}}\text{Ag}$, tronçons de 10,9 cm, entraxe 1 cm entre crayons)</i></p>
--	---

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.

A noter, les tronçons de crayons sont le résultat d'un cisailage conduisant, et pris en compte dans la modélisation, à un effet direct de $^{108\text{m}}\text{Ag}$ sur le coulis au droit des sections de découpe de chaque crayon tandis que l'effet de ce radionucléide est écranté par la gaine inox autour du crayon au droit de la surface cylindrique du tronçon, réduisant ainsi l'effet de son irradiation sur le coulis.

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.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 52/84

Comme expliqué lors de la définition des configurations de colis pénalisantes au 6.5.1.2, la composante vie longue de l'^{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 sur la durée d'intérêt, la démonstration retient le cas d'un colis de déchets avec mix ⁶⁰Co/^{108m}Ag. Les débits de dose déposés dans le 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 :

Crayons absorbants de grappes noires palier 900MW Longueur = 10,9cm Pas (entre axe) 1cm	Rapport ⁶⁰ Co/ ^{108m} Ag à to pour 400 TBq / colis	Débit de dose (Gy/s)		
		Coulis du bloc de déchets	Béton du conteneur	Béton du bouchon
400 kg de déchets <u>Arrangement n°1</u> (mix ⁶⁰ Co/ ^{108m} Ag) colis de référence « enveloppe sur le court terme »	[]	<u>Dans l'amas de déchets</u> 1,188·10 ⁻¹	<u>En fond de coque</u> 9,849·10 ⁻³	3,924·10 ⁻⁶
		<u>En zone de coulis seul</u> 9,620·10 ⁻³	<u>En paroi latérale</u> 1,347·10 ⁻³	
Débit de dose (Gy/s)				
		Coulis du bloc de déchets	Béton du conteneur	Béton du bouchon
1990 kg de déchets <u>Arrangement n°4</u> (mix ⁶⁰ Co/ ^{108m} Ag) colis de référence plus réaliste « enveloppe sur le long terme » de par la présence d' ^{108m} Ag		<u>Dans l'amas de déchets</u> 2,512·10 ⁻²	<u>En fond de coque</u> 1,612·10 ⁻³	1,110·10 ⁻⁴
		<u>En zone de coulis seul</u> 5,332·10 ⁻³	<u>En paroi latérale</u> 1,042·10 ⁻³	

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

6.5.3 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, le modèle DO-RE-MI (Description Opérationnelle de la Radiolyse de L'Eau dans les Matériaux Irradiés) établi par le CEA (P. BOUNIOL) 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 ;

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 53/84

- 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 et ayant pour objectif de tester l'influence du fer sur la radiolyse.
- d'une mise à jour par le CEA, en 2021, du modèle DO-RE-MI, mise à jour qui a permis d'intégrer de nouvelles données de cinétiques concernant les espèces réactives de l'oxygène en fonction de la température, l'introduction de nouvelles phases solides issues de l'hydratation du ciment Portland, la correction d'une erreur concernant la constante de l'équilibre $\text{Fe(OH)}_3^0 \leftrightarrow \text{Fe(OH)}_4^-$ et affectant le produit de solubilité de Fe(OH)_3 , enfin l'introduction de nouveaux équilibres en solution avec Na, K, Al et l'ion sulfate.

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 intégrant un module de chimie de l'influence du fer⁹. L'évolution du fichier DO-RE-MI permet désormais de réaliser les calculs de radiolyse dans le coulis de blocage des déchets en considérant la température à cœur du colis prise égale dans l'étude à 61°C. Un grand nombre de calculs de radiolyse sont réalisés, pour couvrir une large gamme d'état de saturation du colis, et la durée d'intérêt. Cette bibliothèque de résultats permet, via des extrapolations si nécessaire, de fournir à chaque pas de temps, et en suivant l'évolution de la saturation du colis (qui est impactée par le séchage), une valeur de terme source H_2 qui est utilisée dans la modélisation thermo-hydro-mécanique (THM) du colis. Celle-ci est développée en 2D axisymétrique avec Code_Aster et permet pour l'évaluation de la tenue mécanique des colis, de tenir compte à la fois d'une cinétique de séchage des colis, et de production d'hydrogène de radiolyse et de corrosion des déchets au cours 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. 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. La modélisation permet, grâce à ces couplages et à la méthode décrite, de réaliser un calcul mécanique en température dans une configuration non saturée prenant en compte la production d'hydrogène et tenant ainsi compte de l'évolution dans le temps du comportement du colis dans son environnement.

Différentes hypothèses rendent les estimations de la production d'hydrogène de radiolyse et de corrosion des déchets ainsi que 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)

⁹ La liste des réactions secondaires avec le fer a été élaborée à partir d'une revue bibliographique critique et est constituée de 61 réactions (fer de valence II, III et IV). Cette liste comporte entre autres, le couple de réactions à l'origine de la perturbation de la chaîne réactionnelle de Allen et du moindre recyclage de H_2 . L'expérience RETIF a été modélisée par ce nouveau modèle DO-RE-MI et un écart raisonnable entre expérience et modélisation a été mis en évidence, autorisant la réalisation de nouvelles simulations à l'intention des exploitants. La concentration initiale totale en fer(III) dans DO-RE-MI ainsi que sa spéciation ont été calculées à partir de données thermodynamiques en considérant l'équilibre atteint (solution saturée) entre la solution cimentaire et le ferrihydrite Fe(OH)_3 (le plus soluble) et l'hématite Fe_2O_3 (le moins soluble).

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 54/84

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 « thermiques », 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 l' $^{108\text{m}}\text{Ag}$. L'attribution des 400 TBq aux deux radionucléides mentionnés est conservatrice puisque d'autres radioéléments considérés β/γ « thermiques », 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 et celui de la corrosion des déchets, donc la production d'hydrogène.
- Le cumul des hypothèses précédentes à celle d'une masse faible, peu réaliste¹⁰, 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 l' $^{108\text{m}}\text{Ag}$ 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 des 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 très pénalisante, car constante et 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 très enveloppes retenues selon l'hypothèse très pénalisante d'un régime permanent¹¹, impliquent un environnement sec dans le hall qui conduit à un taux d'hygrométrie très faible : une hypothèse pénalisante d'humidité relative (HR) constante de 30% est considérée pour l'étude et la sensibilité du comportement mécanique du colis à cette humidité relative est analysée jusqu'à 5%HR. 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. Outre les variations climatiques en température et HR en fonctions des jours, des mois et des saisons, elle est également pénalisante au sens où ces faibles niveaux d'HR ne seront en réalité pas atteints instantanément, tant le remplissage des halls et son chargement thermique nécessitera de nombreuses

¹⁰ 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.

¹¹ D'autant plus pénalisante qu'une telle hypothèse est irréaliste compte tenu des variations de température et d'hygrométrie de l'air extérieur selon le jour / la nuit, les variations météorologiques, les saisons, etc...

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 55/84

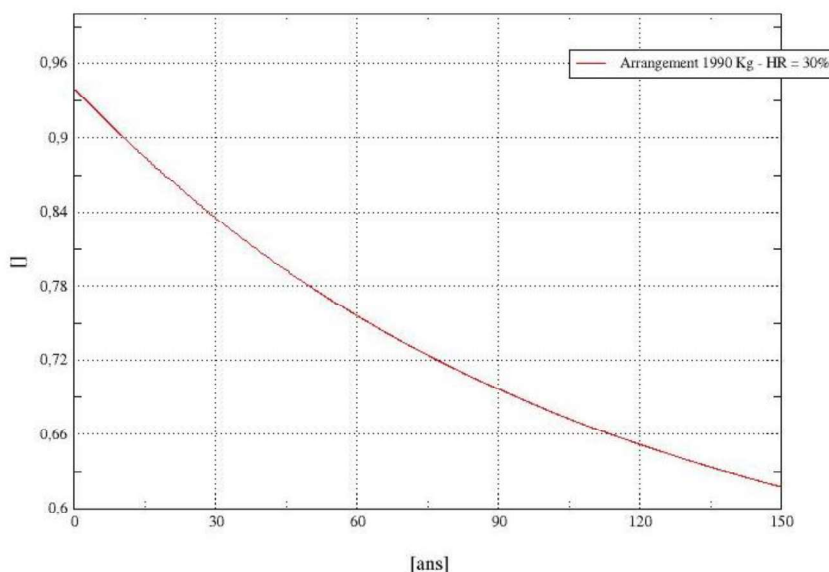
années. Ces valeurs de 30%HR jusqu'à 5% sont désormais comprises¹² dans le domaine de validité¹³ des modèles THM.

- 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 de production d'H₂ 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 le taux de saturation en eau dans le coulis et la quantité d'hydrogène produit en fonction du temps.

Saturation dans le coulis



Impact de la cinétique de séchage des colis en hall ventilé sur le taux de saturation en eau dans le coulis cimentaire de blocage des déchets (61°C dans le colis, 30%HR et 48°C dans le hall pour une puissance installée de 80 kW)

Cette courbe du taux de saturation dans le coulis cimentaire en fonction du temps liée à la cinétique de séchage du colis est confortée par des mesures de succion ou de pression capillaire réalisées sur échantillons de coulis mis en œuvre sur ICEDA pour le blocage des déchets. Elle est issue d'un modèle qui applique en condition

¹² Une thèse (2017-2020) sur le thème du séchage des bétons ouvre désormais le domaine de validité du modèle pour toute valeur de HR, y-compris 30%HR et valeur inférieure.

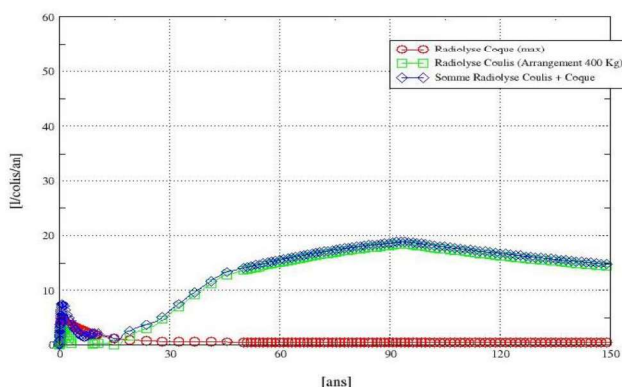
¹³ Dans les indices précédents du référentiel, le domaine de validité des modélisations se limitait à une HR ≥ 50%, impliquant de fait une capacité thermique des halls d'entreposage limitée à 30 kW.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 56/84

d'entrée l'hypothèse pénalisante (et irréaliste) d'une humidité relative de l'air environnant le colis constante et égale à 30% sur 150 ans, dans les conditions d'entreposage à ICEDA ainsi que dans celles de stockage réversible à CIGEO. Cette valeur est pénalisante du point de vue du niveau d'humidité relative attendu dans les alvéoles à CIGEO.

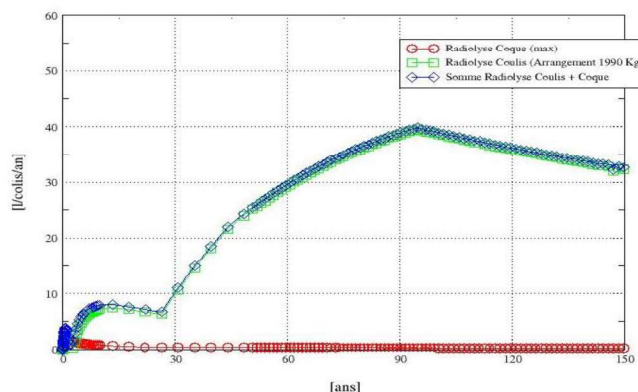
Considérant les configurations de colis « enveloppe » présentées ci-avant, en particulier la présence d'un mix $^{60}\text{Co}/^{108\text{m}}\text{Ag}$, on constate que, durant la phase d'entreposage à ICEDA (jusqu'à 50 ans), le débit d'hydrogène (effet de la corrosion des déchets inclus) est toujours inférieur à 25 litres/an/colis (cf. figures ci-après) et donc bien inférieur au seuil de 60 litres/an/colis retenu par l'Andra pour les colis MAVL d'ICEDA dans les spécifications préliminaires d'acceptation des colis à CIGEO (cf. [34]). 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 (jusqu'à 150 ans) est de 40 litres/an/colis et qu'en conséquence, malgré la radiolyse et la corrosion des déchets, le seuil de 60 litres/an/colis ne pourra jamais être atteint (cf. figures ci-après). Ces résultats tiennent compte d'une mise à jour à partir des données expérimentales relatives à la valeur de perméabilité, de celle du taux de saturation initial du béton de la coque, de la nouvelle version du modèle DO-RE-MI du CEA et du modèle THM tenant compte de la thèse réalisée.

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 $^{60}\text{Co}/^{108\text{m}}\text{Ag}$, 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 $^{60}\text{Co}/^{108\text{m}}\text{Ag}$, HR hall 30%)

A noter également 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 .

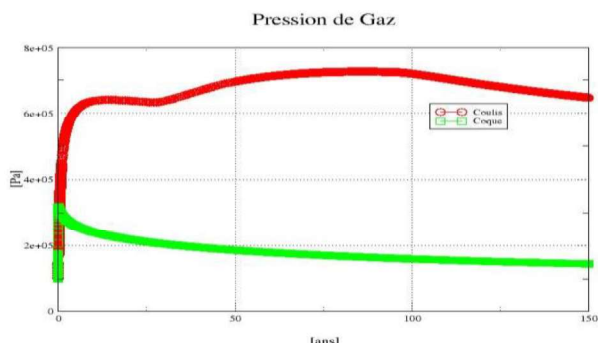
6.5.4 Capacité du colis C1PG^{SP} MAVL ICEDA à évacuer l'hydrogène de radiolyse et de corrosion des déchets

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) qui porte la fonction de confinement.

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,

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 57/84

les pressions de gaz sont uniformes et stables dans le temps, autour de 6 à 7 bars à l'intérieur du coulis (cf. figure ci-après).



Evolution de la pression d'H₂ 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 ⁶⁰Co/^{108m}Ag, HR hall 30%).

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 de l'ordre 3,3 bars.

A 50%HR 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. Le niveau de pression de gaz (i) dans le coulis qui est également stable mais de l'ordre de 3.6 bars (ii) dans le béton enveloppe externe du colis estimé au pic à 1.8 bars.

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.

6.6 RÉSISTANCE MÉCANIQUE DU COLIS C1PG^{SP} MAVL ICEDA SOUS L'EFFET DU SÉCHAGE ET DE LA PRODUCTION D'HYDROGENE

6.6.1 Modélisation Thermo-Hydro-Mécanique

La modélisation Thermo-Hydro-Mécanique (THM) du colis C1PG^{SP} 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^{SP} car elle prend déjà en compte la présence du panier métallique contenant les déchets.

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 et corrosion des déchets 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 aux éléments finis 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 de cinétique de corrosion des déchets d'une part, d'autre part du code CHEMSIMUL et du modèle DO-RE-MI estimant la production d'hydrogène de radiolyse, couplée à celle de la corrosion des déchets, 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

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 58/84

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 lors de calculs préalables.

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 la 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.

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. En complément, l'épaisseur requise pour le maintien des propriétés de confinement de l'enveloppe externe du colis (cf. § 4.2.5) est matérialisée sur les figures par un trait blanc positionné à 5,4 cm du bord intérieur du conteneur. Enfin, un trait vert figure également sur les graphiques afin de matérialiser l'épaisseur maximale endommagée en bord externe du béton du colis du fait du séchage pour chaque échéance de temps considérée.

6.6.2 Résultats de la modélisation

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

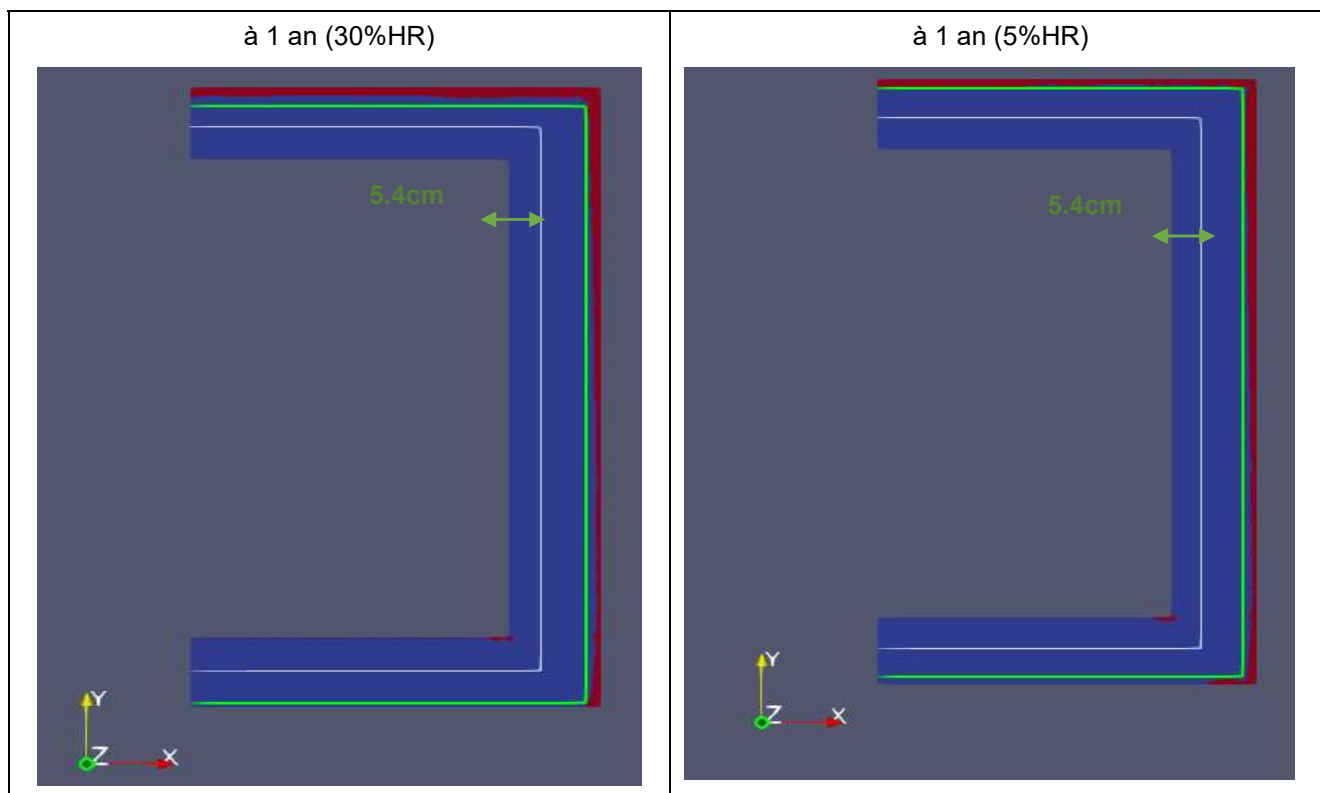
Nota : Après 10 ans, la modélisation indique en peau du colis des zones de traction qui diminuent progressivement du fait des pressions capillaires qui s'équilibrent et du fait que les contraintes totales s'écrivent de manière incrémentale (en fonction de l'incrément de pression capillaire). La représentation graphique des isovalues ne permet alors plus de représenter complètement l'état d'endommagement du colis dans ces zones. En effet, ce qui est endommagé le reste de manière irréversible, il faut donc considérer que les zones susceptibles d'être endommagées qui sont présentées à une échéance donnée restent endommagées par la suite. C'est la raison pour laquelle ces zones sont délimitées par un trait vert sur les figures.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 59/84

Rappelons que les résultats suivants sont basés sur des conditions ambiantes (i) de 48°C¹⁴ dans le hall d'entreposage, (ii) une hygrométrie dans le hall 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 retenues selon l'hypothèse très pénalisante d'un régime permanent, conduisent à l'hypothèse pénalisante d'une humidité relative (HR) moyenne constante de 30% dans le hall. 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. Outre les variations climatiques en température et HR en fonctions des jours, des mois et des saisons, elle est également 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.

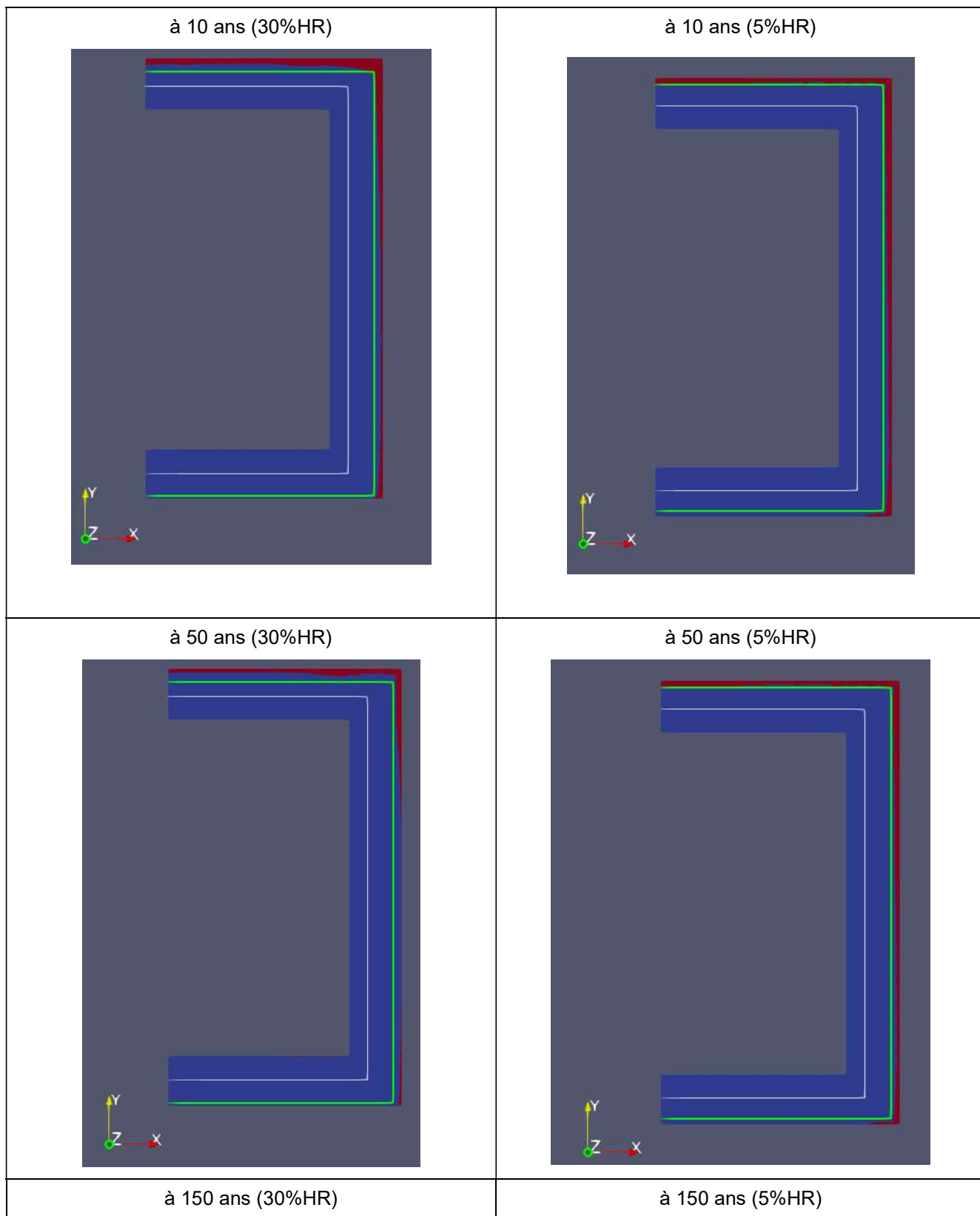
En complément, des résultats sont proposés selon les mêmes hypothèses pénalisantes en considérant une valeur encore plus faible d'humidité relative égale à 5%HR permettant si besoin de démontrer la tenue mécanique des colis les plus thermiques autour desquels le niveau d'humidité relative atteindrait localement (ie. à proximité d'un colis) des valeurs inférieures à celle considérée en moyenne à 30% dans le hall.

Ces résultats démontrent qu'il n'est pas nécessaire de fixer un paramètre garanti associé à un critère à respecter en ce qui concerne le niveau d'humidité relative dans l'air des halls d'entreposage, y-compris dans l'empilement des colis.

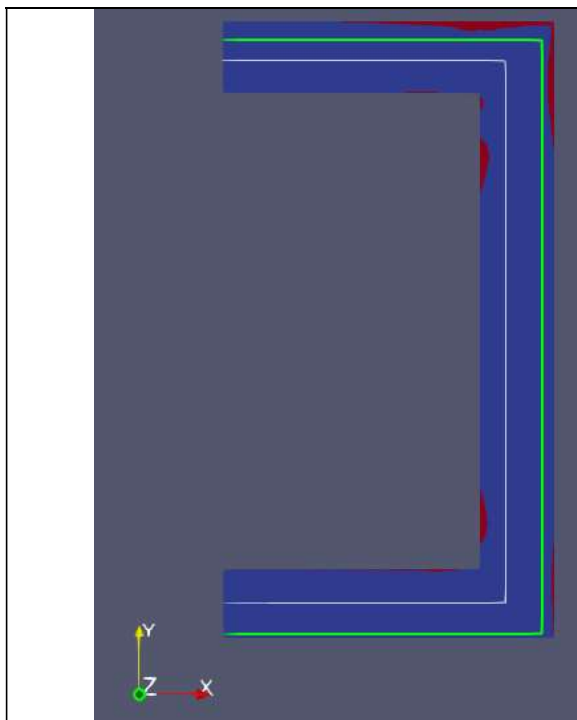


¹⁴ Valeur relative à une température externe pénalisante constante de 34°C selon le référentiel « grand chaud » du site du Bugey et considérant une puissance thermique de 80 kW/hall plein, sans variation saisonnière ni atténuation sur la durée.

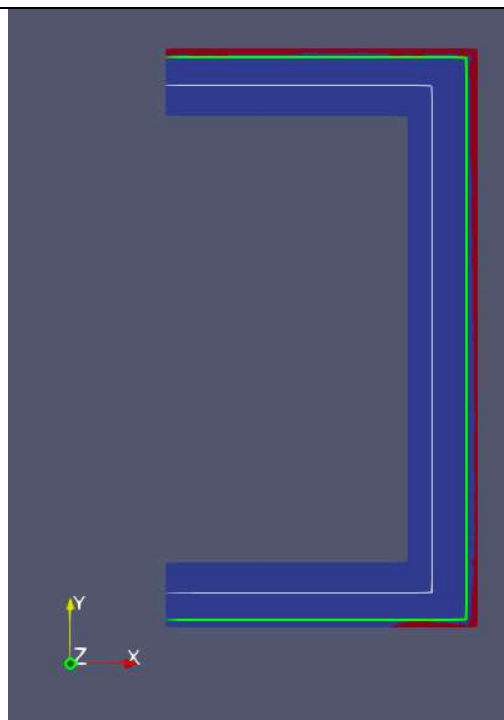
	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 60/84



	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 61/84



Isovalues des contraintes principales pour le colis de référence « enveloppe sur le long terme » (1990 kg de déchets mix $^{60}\text{Co}/^{108}\text{mAg}$, 30%HR)




Isovalues des contraintes principales pour le colis de référence « enveloppe sur le long terme » (1990 kg de déchets mix $^{60}\text{Co}/^{108}\text{mAg}$, 5%HR)

L'épaisseur de cette zone en traction supérieure à 5,19 MPa (zones en rouge) n'empiète pas dans l'épaisseur de 5,4 cm requise pour le maintien des propriétés de confinement et de durabilité du colis (cf. § 4.2.5) matérialisée sur les figures par un trait blanc. Pour les zones potentiellement endommagées à 150 ans figurant du côté intérieur de la paroi verticale du colis, l'épaisseur d'endommagement constatée reste faible et permet de conserver une épaisseur homogène de béton sain de 5,4 cm a minima à cœur de la paroi de béton.

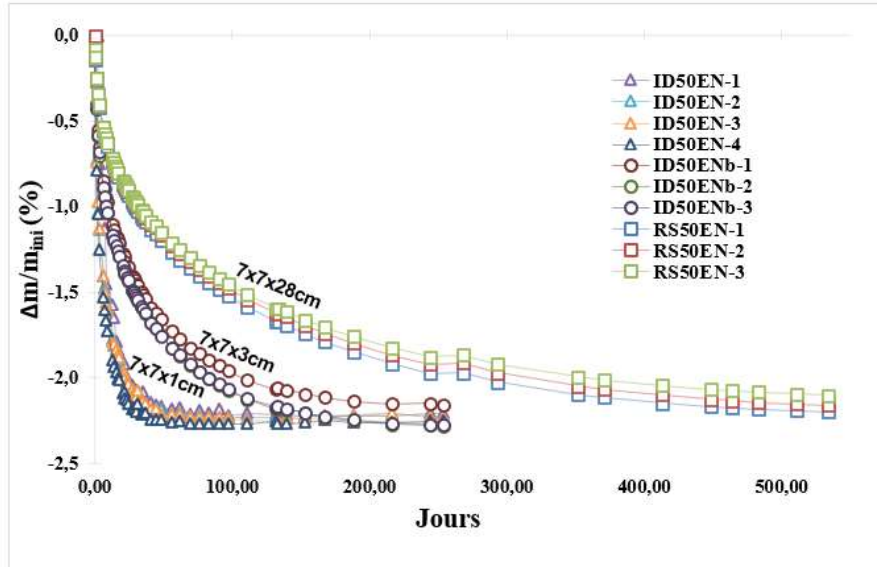
Ces résultats « enveloppe » compte tenu des hypothèses conservatives confirment qu'une éventuelle dégradation, si elle devait apparaître, dans l'épaisseur de l'enveloppe externe du colis (coque + bouchon) ne serait pas préjudiciable vis-à-vis du caractère confinant du colis, que ce soit au cours des 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).

6.6.3 Influence de la perméabilité du béton

L'étude de sensibilité conduite pour le colis de référence « enveloppe sur le long terme » (1990 kg de déchets mix $^{60}\text{Co}/^{108}\text{mAg}$, 30%HR) vis-à-vis du paramètre dimensionnant qu'est la perméabilité du béton s'appuie sur différentes mesures de perméabilité réalisées sur des éprouvettes de différentes tailles de béton F44Adj, béton constitutif de la coque et du bouchon du colis MAVL d'ICEDA. Trois différentes géométries par lot de 3 éprouvettes ont été testées : 3 éprouvettes 7x7x28cm, 3 éprouvettes 7x7x3cm et 4 éprouvettes de 7x7x1cm. Ces essais améliorent notre connaissance de la sensibilité de la perméabilité et de la cinétique de transfert dans le béton à l'épaisseur de l'éprouvette testée. De plus, le grand nombre (au total 10) d'éprouvettes testées permet de mieux cadrer les incertitudes expérimentales. Les courbes de pertes de masses expérimentales obtenues par ces essais sont montrées sur la figure suivante. On peut constater que les courbes correspondant à chaque

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 62/84

dimension d'éprouvettes sont assez bien regroupées. Cela signifie que la dispersion des mesures est assez limitée. Ces observations montrent la cohérence et la reproductibilité des résultats de mesure.



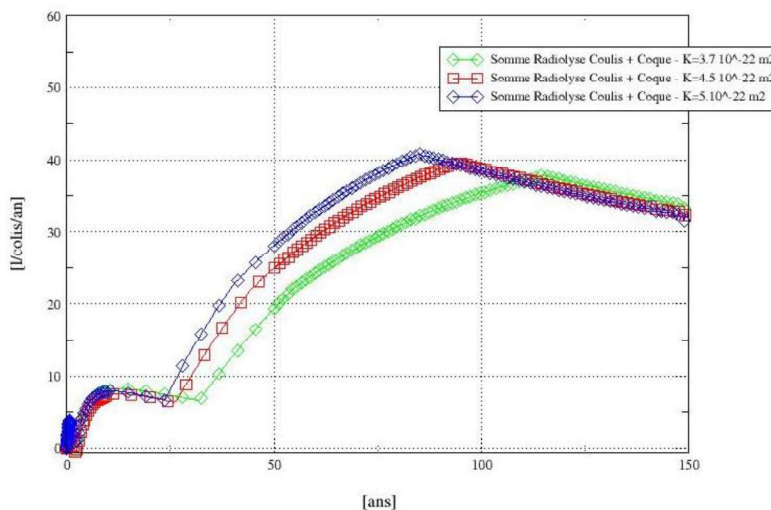
Résultats des essais de pertes de masse sur le béton F44adj à 50°C et 30%HR

Le modèle THM appliqué à chaque géométrie d'éprouvettes dans les conditions d'essais imposées a permis de déterminer trois valeurs de perméabilité :

- $K = 3,7 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ recalée sur la cinétique de séchage des éprouvettes de 7x7x28cm
- $K = 5,010 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ recalée sur la cinétique de séchage des éprouvettes de 7x7x3cm
- $K = 4,4 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ recalée sur la cinétique de séchage des éprouvettes de 7x7x1cm

Pour rappel, la valeur retenue dans le modèle THM appliqué au colis MAVL d'ICEDA est fixée à $4,5 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$, cette valeur permettant de lisser le plus fidèlement les trois cinétiques de séchage précédentes.

La sensibilité de ces valeurs sur le débit de production d'hydrogène par an et par colis est présentée ci-après :



Débit d'hydrogène par an par colis en fonction de la perméabilité du béton (colis de référence « enveloppe sur le long terme » (1990 kg de déchets mix 60Co/108mAg, 30%HR)

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 63/84

La sensibilité à la perméabilité du béton montre un effet sur le décalage du pic de production d'hydrogène dans le colis sans toutefois révéler un effet majeur sur la valeur de ce pic qui varie d'un cas à l'autre de quelques unités. Aussi, le critère d'acceptabilité fixé à 60 litres/an/colis par l'Andra à réception des colis à CIGEO demeure respecté.

La sensibilité à la perméabilité du béton montre en définitive sur le plan mécanique une dégradation superficielle en peau de colis très comparable aux figures présentées au paragraphe 6.6.2 démontrant le maintien de l'intégrité de l'épaisseur de 5,4 cm requise côté intérieur du colis pour garantir ses propriétés de confinement.

6.7 DURABILITÉ 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.

Cela 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.

6.7.1 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 ;

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 64/84

- 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, la substitution du ciment par la fumée de silice et une grande quantité de filler siliceux permet la maîtrise de l'exothermie.

Le conteneur fabriqué en usine de préfabrication fait l'objet de l'application de produit de cure sur béton frais pour la partie non moulée (fond du conteneur) et au démoulage pour la partie moulée (voiles du conteneur). 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.

6.7.2 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 6.6. 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 :

- 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 relaxerait les contraintes).

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 65/84

Comme évoqué dans le paragraphe 6.6, la modélisation présente désormais des résultats consolidés considérant un domaine de validité apte à réaliser des calculs jusqu'à 30%HR et en deçà, jusqu'à 5%HR en cas pénalisant extrême.

Ce domaine de validité s'appuie en effet sur un programme de travail, rappelé ci-après, qui définit les études et les essais complémentaires réalisés.

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

- 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 et en deçà), à température ambiante dans des conditions dites normales et à 50°C,
- 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} dont les résultats sont présentés dans le Référentiel (cf. § 6.4).

Des essais sur la matrice béton constitutive de l'enveloppe du colis ont été réalisés en accompagnement de ce programme numérique. Les paramètres expérimentaux évalués sont détaillés ci-après.

• Mesure des isothermes 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 indépendants, au cours desquels des échantillons sont placés dans un milieu maintenu à une humidité relative et une température donnée jusqu'à atteinte d'un état d'équilibre hydrique dans le béton. Pour cette méthode, on impose une humidité relative à l'extérieure à l'aide de solutions salines saturées, et on mesure la perte de masse d'eau jusqu'à obtention de l'équilibre. Le point d'équilibre correspond alors à un point sur la courbe de succion (ou désorption). Plusieurs courbes de séchage et valeurs finales à l'équilibre sont alors établies pour une même température et différentes humidités relatives (en allant suffisamment bas pour couvrir un fort séchage), permettant ainsi de tracer l'ensemble de l'isotherme de désorption à cette température. Les résultats ainsi obtenus, couplés aux résultats d'essais de séchage, permettent également de recalculer la valeur de perméabilité intrinsèque du béton.

Les essais sont faits pour deux niveaux de température, à 20°C et 50°C. Une méthode complémentaire (dite « DVS », par l'utilisation d'une balance de sorption) a été étudiée pour enrichir ces mesures.

• Détermination de la perméabilité

La perméabilité régit la cinétique de séchage avec la courbe de désorption. Les données expérimentales (cf. 6.5.1.5) permettent, par recalage à partir du modèle, de déduire une valeur de perméabilité intrinsèque du béton de l'enveloppe du colis. 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 $K_l(S_l) = K_{int} k_r^l(S_l)$. En tenant

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 66/84

compte de la dépendance à la température, c'est finalement $K_l(S_l, T)$ que l'on souhaite identifier pour permettre la réalisation des simulations. Les essais précédemment décrits permettent cette identification.

Compte tenu du résultat de ces investigations et de leur application dans la modélisation, en particulier pour des humidités relatives très faibles à proximité des colis (cf. § 6.6), **EDF propose le passage des halls à la puissance de 80 kW/hall telle que définie dans le domaine de fonctionnement d'ICEDA.**

6.7.3 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, que ce soit par réduction des propriétés mécanique du ferrailage, ou par gonflement des armatures résultant de l'apparition de couches d'oxydes.

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 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.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 67/84

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. ALLAHYARI¹⁵ (2016) et de E. DROUET¹⁶ (2010).

L'analyse par EDF des précédentes thèses indique néanmoins que les résultats présentés ne sont pas transposables au béton du C1PGSP étant donné (i) qu'il s'agit de résultats obtenus sur pâte de ciment et non pas sur béton, (ii) que le béton du C1PGSP 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 exerce une influence sur la nature cristallographique du carbonate de calcium formé (calcite / aragonite / vaterite) 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)
- 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 peut laisser pénétrer le CO₂ favorisant ainsi la carbonatation.

¹⁵ Approche performancielle 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

¹⁶ 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

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 68/84

- 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'EDF a investigué, sur la période 2019-2021, selon les axes suivants :

- Bibliographie sur la carbonatation dans les bétons et les cinétiques de corrosion des armatures (réalisée en 2020),
- Essais simples de saturation/désaturation d'éprouvettes en laboratoire et, nouveaux essais de carbonatation accélérée sur éprouvettes équilibrées en humidité relative :
 - En 2019, des essais ont été menés selon le protocole de la norme française expérimentale XP P 18-458 (20°C, 65%HR, 50% de CO₂), avec un pré-conditionnement relatif à un séchage des corps d'épreuve à 45°C jusqu'à masse constante puis mise en équilibre thermo hydrique à 20°C / 65 % HR). Ces essais n'ont pas permis de mettre en évidence la carbonatation du béton au terme des 186 jours d'essais [42].
 - En 2020, d'autres essais ont été conduits en tenant compte de conditions plus représentatives de la situation transitoire, celle potentiellement défavorable en matière de carbonatation telle qu'évoquée ci-avant. Les essais ont été réalisés dans des conditions de température représentatives de celles des halls d'entreposage d'ICEDA en phase exploitation (50°C) et d'humidité relative pénalisante (70% HR). Ces conditions d'essais ont été choisies de façon à obtenir une porosité du béton partiellement saturée, davantage favorable au phénomène de carbonatation [43] que celles des essais de 2019. La saturation en CO₂ dans l'enceinte de carbonatation était de 3%, conformément aux protocoles actuellement en vigueur (norme européenne NF EN 12390-12) ou proposés par le Projet National PerfDuB qui devrait à terme fixer le mode opératoire de la norme française. Les résultats de ces essais indiquent une profondeur de carbonatation nulle pour l'ensemble des échéances (jusqu'à 259 jours d'essais).
- S'appuyant sur les résultats d'essais de carbonatation précédents et considérant ainsi des armatures dans un milieu cimentaire passivé, une étude d'évaluation de la contrainte générée par le gonflement des armatures a été initiée, tenant compte de leur diamètre, leur nombre, leur position, etc., afin de comparer cette contrainte avec la résistance en traction du béton du colis, pour évaluer le risque d'éclatement, en cas de corrosion. Cette étude s'appuie sur une analyse bibliographique préalable permettant de définir la nature des produits de corrosion de l'acier noir en milieu cimentaire (expansion de volume traduit par le rapport de Pilling-Bedworth, module de Young) et la cinétique de corrosion de cet acier en milieu cimentaire non carbonaté. Les résultats de cette analyse sont les suivants :
 - Le rapport de Pilling-Bedworth le plus élevé, donc le plus défavorable vis-à-vis de la tenue du béton, est obtenu pour les oxy-hydroxydes de fer (goethite ou lépidocrocite) à une valeur de 3,2.
 - Le module de Young en sens transversal, perpendiculairement aux strates de produits de corrosion, est pris égal en valeur initiale inférieure à 1 GPa, ce qui correspond à une très fine couche de produits de corrosion, et évolue ensuite jusqu'à 30 GPa.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 69/84

- La cinétique de corrosion retenue, issue de la littérature scientifique, est détaillée dans le paragraphe suivant (cf. § 6.7.4) relatif aux résultats de l'étude d'impact de la corrosion des armatures sur l'enveloppe confinante en béton du colis.

6.7.4 Corrosion des armatures de l'enveloppe confinante en béton du colis

[]

Une étude de l'effet de la corrosion des armatures sur le béton de l'enveloppe externe du colis a été réalisé afin d'estimer le risque de dégradation du colis versus le maintien d'une épaisseur intègre minimale de confinement, c'est-à-dire sans risque de fissuration, du béton autour des déchets. L'étude se concentre en particulier sur la zone en tête du colis, car elle constitue une zone à haute concentration en armatures.

[]

Sur le plan de la physique, l'approche numérique considère un modèle de comportement mécanique élastique basé sur deux jeux concernant le module d'Young et le rapport de Pilling-Bedworth décrits précédemment : un jeu conservatif (resp. 30 GPa et 3,2) et un jeu plus représentatif des valeurs moyennes de ces paramètres (resp. 5 GPa et 2,5), de manière à observer la sensibilité des résultats. Une modélisation 3D aux éléments finis développée avec Code_Aster V15.4 représente un secteur angulaire du colis cylindrique, secteur dans lequel les armatures verticales et horizontales sont représentées. L'expansion de la couche de rouille a été prise en compte par une dilatation thermique équivalente des barres corrodées, la couche de rouille n'étant pas modélisée de manière explicite dans le modèle aux éléments finis.

Ainsi, on prend pour la rouille des valeurs moyennes des paramètres (coefficient d'expansion thermique et module de Young), qui rendent compte du comportement à la fois du métal corrodé et non corrodé, avec l'hypothèse d'une déformation uniforme sur le périmètre.

Armatures de la coque et modélisation 3D

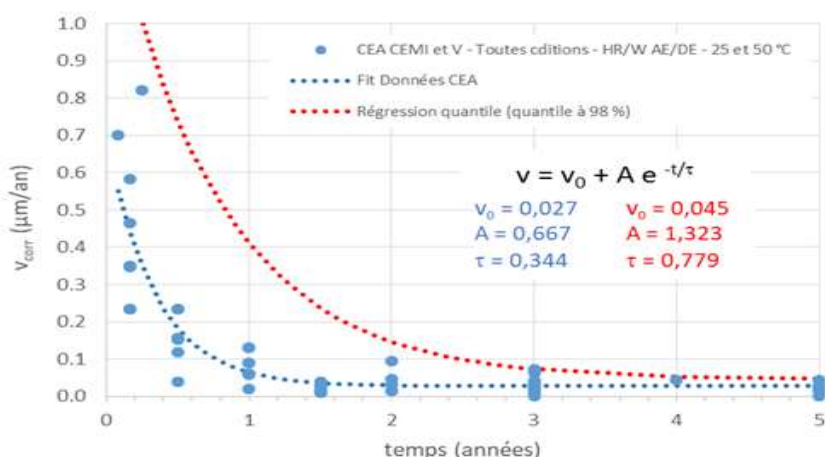
La variable de sortie observée est la contrainte principale majeure dans le béton avec comme hypothèse, en cohérence avec le critère de rupture de Rankine, que le point matériel de maillage arrive à rupture si cette contrainte dépasse la résistance à la traction minimale de 5,19 MPa pour le béton du colis. On rappelle que 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.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
	DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0

Deux modes de rupture sont identifiés dans l'étude pour différentes valeurs d'épaisseur d'acier corrodée :

- Un mode 1 selon lequel, pour les armatures verticales, la contrainte principale de traction est orientée dans la direction orthoradiale par rapport à l'axe des armatures. Cela peut générer des fissures dans le béton dans la direction radiale des barres d'acier.
- Un autre mode 2 selon lequel, pour les armatures horizontales, les fissures radiales qui peuvent se former sur les armatures horizontales dans la tête du colis se joignent en direction verticale.

Sur la base de ces constats, l'étude montre qu'une valeur d'épaisseur corrodée de référence égale à 0,004 mm peut être considérée comme une valeur en deçà de laquelle la fissuration éventuelle ne conduit pas à un endommagement significatif du colis. Cette valeur a été obtenue pour le jeu de paramètres conservatif. Le mode de rupture 2 a lieu avant le mode de rupture 1 et est donc celui qui contrôle la tenue mécanique de la coque.

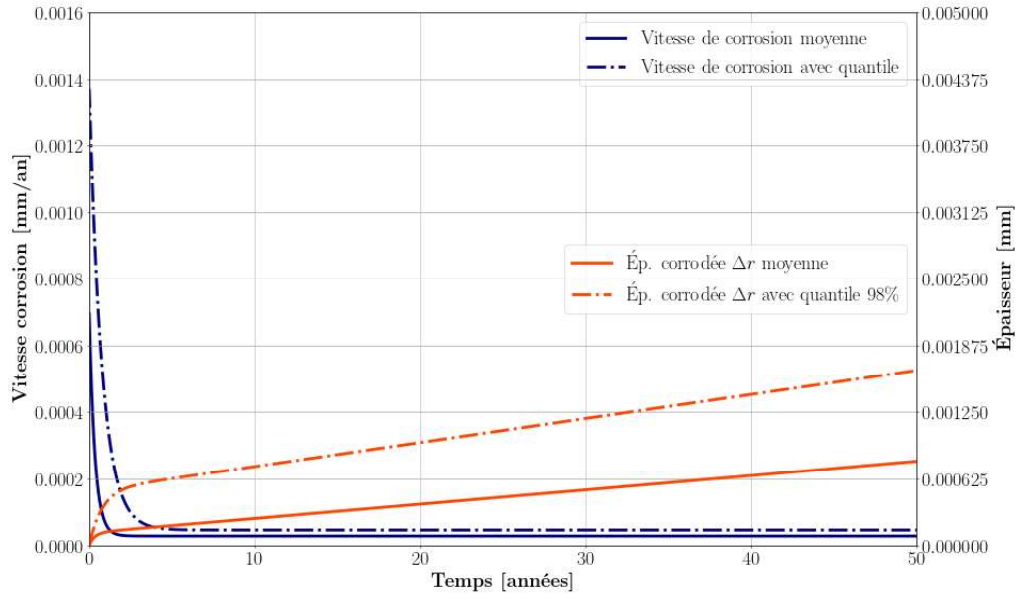


Lois de cinétique de corrosion d'un acier noir : loi de référence lissée sur les points expérimentaux du CEA, loi corrigée enveloppe au quantile 98%

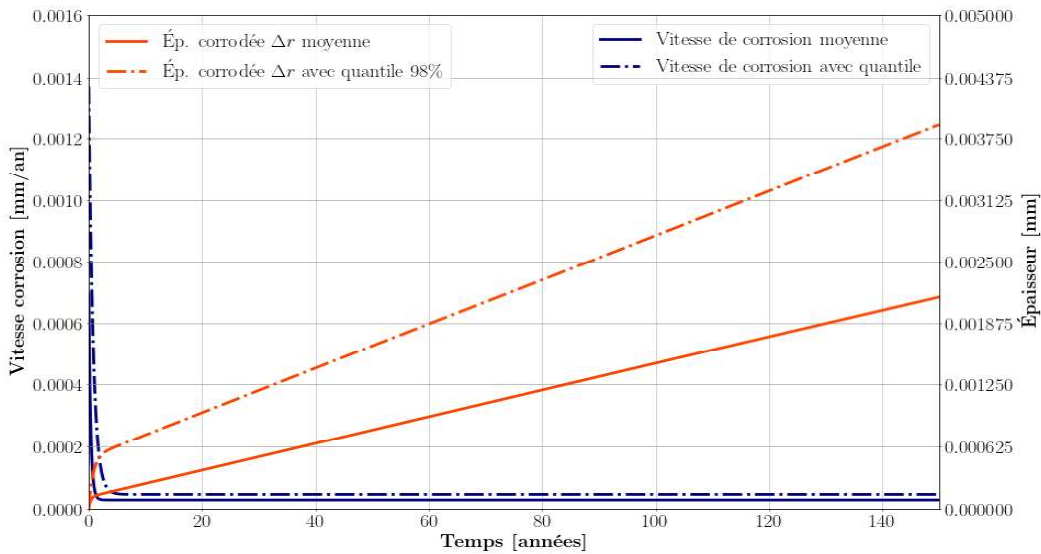
Considérant une loi de cinétique de corrosion représentative d'un état non carbonaté du béton du colis pour un acier noir du type de celui des armatures de la coque C1PG^{SP}, une évaluation de la tenue de l'enveloppe externe en béton du colis à la corrosion est proposée ci-après à l'échéance de 50 ans relative à la sortie du colis d'ICEDA vers CIGEO, puis à l'échéance de 150 ans relative à la fin de la période de réversibilité de ce stockage en couches géologiques profondes.

La loi de cinétique de corrosion retenue repose sur des données expérimentales du CEA donnant une évolution de l'épaisseur corrodée d'un acier noir en fonction du temps. La comparaison des données expérimentales aux résultats numériques de l'étude montre que, si la loi recalée est prise en référence, la rupture du béton ne peut pas avoir lieu car l'épaisseur corrodée maximale atteinte pour le jeu conservatif aux échéances respectivement de 50 ans (i.e. sortie du colis d'ICEDA / réception à CIGEO) et de 150 ans (i.e. fin de période de réversibilité de CIGEO) reste bien inférieure à la valeur de référence de 0,004 mm en deçà de laquelle aucun risque de fissuration du béton n'est constaté.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
	DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0




Vitesses et épaisseurs de corrosion à l'échéance de 50 ans de réception des colis à CIGEO (jeu conservatif)



Vitesses et épaisseurs de corrosion à l'échéance de 150 ans relative à la fin de période de réversibilité de CIGEO (jeu conservatif)

Dans le but de tenir compte des incertitudes relatives aux données expérimentales du CEA, une marge au quantile à 98% sur les points de mesures de la vitesse de corrosion peut être prise en compte (cf. figures précédentes), modifiant de fait la loi de cinétique de corrosion prise en référence sans que l'effet sur l'épaisseur corrodée maximale atteinte pour le même jeu conservatif la rende supérieure à la valeur de référence de 0,004 mm, de sorte qu'aucune fissuration ne soit observée aux échéances de 50 et 150 ans.

De manière identique, pour le jeu de paramètres plus représentatifs, les résultats ne montrent pas de formation de fissure verticale à 50 ou 150 ans pour toutes les lois de cinétique de corrosion considérées (loi de référence, loi corrigée au quantile 98%).

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 72/84

Rappelons que pour l'étude mécanique et pour la loi de cinétique de corrosion, des paramètres conservatifs ont été utilisés et associés à un cumul de conservatismes adoptés pour pallier le manque relatif de connaissances, notamment sur le rapport de Pilling-Bedworth et sur la cinétique de corrosion sur des temps longs. En particulier, la vitesse de corrosion considérée par l'étude en régime permanent est déterminée à partir de points expérimentaux obtenus sur 5 ans donnant une asymptote appliquée de manière constante sur 150 années : cette hypothèse a un impact fort sur les résultats à 150 ans, car elle donne lieu à un terme linéaire sur l'épaisseur corrodée. Un autre élément de conservatisme concerne l'hypothèse de comportement élastique du béton. En effet, le béton est en réalité caractérisé par un comportement viscoélastique, ce qui fait que l'état des contraintes et de déformation en général évolue dans le temps sans modification des charges. Ce comportement viscoélastique donne lieu à de la relaxation des contraintes dans le cas de déformations imposées : les contraintes diminuent alors progressivement dans le temps.

En définitive, l'étude de corrosion des armatures du colis démontre l'absence de risque de fissuration aux échelles de temps d'entreposage des colis à ICEDA (50 ans) et de stockage en période de réversibilité à CIGEO (150 ans).

6.7.5 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 (O_2 , H_2O_2 ...).

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 6.5.2, 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.

6.7.6 Alcali-réaction

6.7.6.1 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.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 73/84

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 P18-594 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 P18-464 (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 P18-454 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 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 %.

A noter, le contexte normatif (cf. norme FD P18-464) 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.

6.7.6.2 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 (Na₂O et K₂O dans le ciment ou provenant d'autres origines dans les formulations).

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 74/84

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 NF P18-454. 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 P18-454 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.

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 NFP18-454 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 définis du colis.

6.7.7 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

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 75/84

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/IFSTTAR¹⁷ 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 ou un liant 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 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.
- Lors d'essais de chauffe à la prise à 65°C et 75°C suivi de chauffe en simulation d'entreposage à 75°C sur 10 jours et 28 jours sur des éprouvettes enrubannées représentatives du coulis dans un colis à ICEDA : les résultats de gonflements obtenus respectent les dernières recommandations du LCPC en matière de tenue à la RSI (cf. recommandations IFFSTAR de 2017) (cf. [46]).

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].

¹⁷ Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 76/84

Enfin, le processus et les conditions de fabrication du colis C1PG^{SP} MAVL d'une part, les conditions d'entreposage de ces mêmes colis d'autre part, 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.

6.8 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 minime. 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 Groupe de Travail « 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.

6.9 TENUE DES COLIS À 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^{E+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^{E+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 1,25^{E+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 ⁶⁰Co et d'^{110m}Ag.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 77/84

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. § 6.5.4).

6.10 INTEGRITE MÉCANIQUE 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 (resp. 75°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 ventilé totalement rempli (resp. non ventilé). 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, sa décroissance radiologique conduisant à celle de sa puissance thermique résiduelle. 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 et de corrosion des déchets

Les éléments présentés dans le paragraphe 6.4 complétés de la réponse à la Position/Action n°15 [3] 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, à chaque échéance de temps de vie du colis considérée par le calcul, pour un taux de saturation lié au séchage des matrices cimentaires du colis à cette échéance, dans sa phase de production maximale d'hydrogène.

- 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 « thermiques ») 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. §6.9). 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 6.7.2, complétés de la réponse à la Position/Action n°15 [3], compte tenu de l'amélioration de nos connaissances et de nos modèles, il est estimé, après 50 ans d'entreposage et sur la durée de stockage réversible à CIGEO, 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

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 78/84

en deçà des 5,4 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 6.7.2 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 6.8, 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 en surface par le phénomène de séchage/dessiccation. EDF ne dispose néanmoins pas de démonstration expérimentale sur ce point.

Enfin, concernant le comportement à la chute du colis, nos connaissances indiquent désormais que les propriétés mécaniques du béton des colis peuvent être en surface impactées par les conditions hydriques en entreposage lorsque les halls pleins portent une puissance thermique totale de 80 kW/hall :

- Une étude plus complète que les essais normatifs standards démontre néanmoins l'absence de carbonatation du béton du colis favorable à une corrosion des armatures du colis en situation d'entreposage (cf. §6.7.3).
- Un travail de thèse conduit sur le thème du séchage/dessiccation du béton du colis confirme la validité des résultats de calculs présentés au paragraphe 6.6 pour des humidités relatives faibles (autour de 30%HR).

C'est la raison pour laquelle EDF propose désormais dans le paragraphe 6.7.2 de revenir à la limite de puissance thermique de 80 kW par hall d'entreposage comme indiquée dans le domaine de fonctionnement de l'installation.

• Comportement à la chute d'un colis après 50 ans d'entreposage

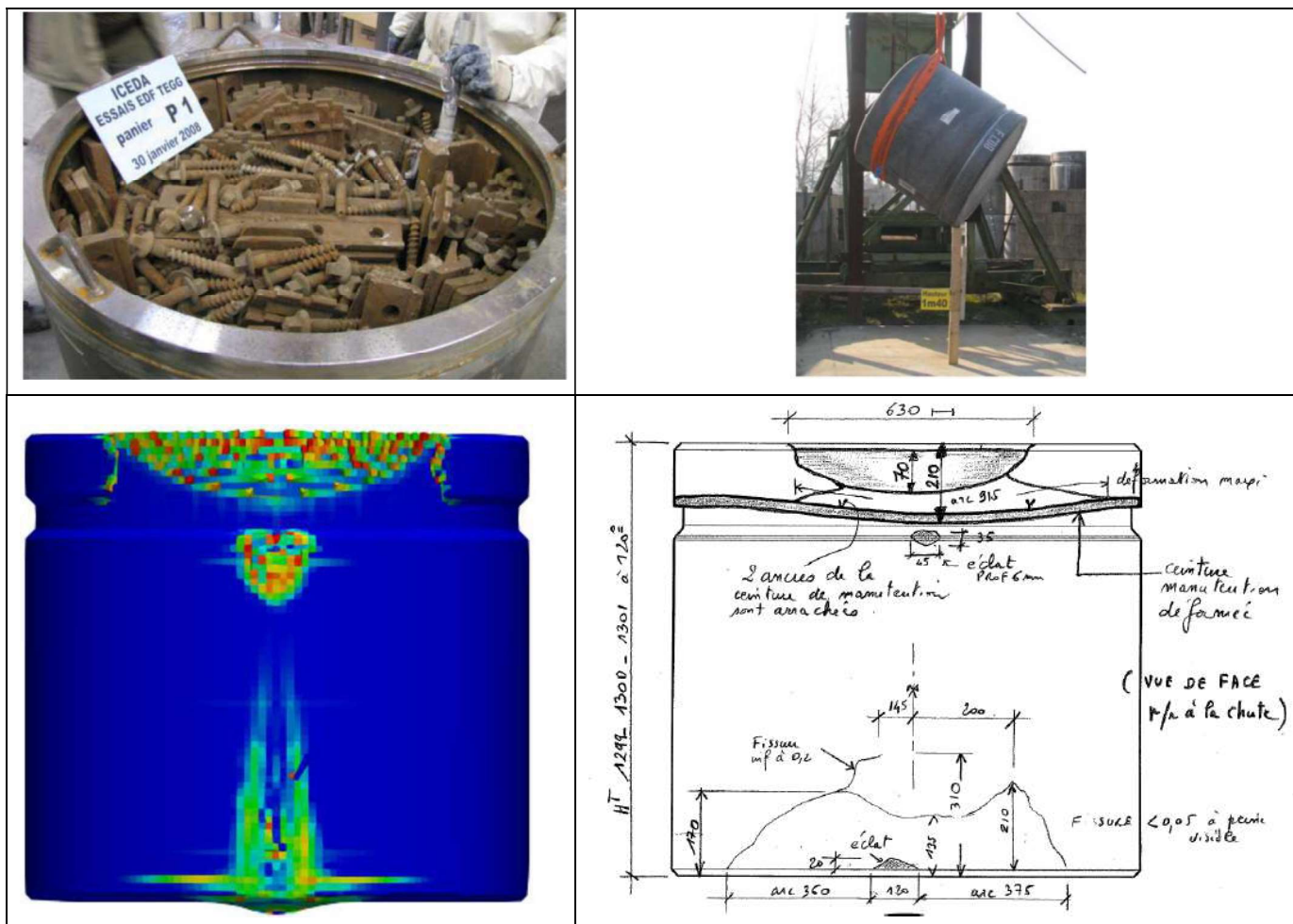
Dans l'impossibilité matérielle de pouvoir tester de manière expérimentale la chute d'un prototype de colis qui aurait connu une phase préalable similaire à un entreposage de 50 ans dans les conditions thermiques et hydriques des halls d'ICEDA, une étude démontre de manière qualitative par le biais d'une approche numérique par modélisation dynamique aux éléments finis (code EUROPLEXUS¹⁸) le comportement à la chute d'un colis dont les propriétés sont d'avantage représentatives d'un colis ayant été soumis aux conditions d'entreposage caractéristiques d'ICEDA.

Le code EUROPLEXUS simule, en dynamique, l'érosion/dégradation sous impact du béton avec la loi de comportement DPDC comme Damage Plastic Dynamic Concrete. Cette loi repose, parmi plus de 25 paramètres dont le module d'Young, le coefficient de Poisson, la limite en rupture en compression, le diamètre des agrégats, etc..., sur le choix d'un critère d'érosion basé sur la déformation volumique maximale acceptable. A ce critère est associé une valeur seuil au-delà de laquelle un élément fini du maillage 3D est considéré dégradé.

¹⁸ De copropriété CEA et CCR (Centre Commun de Recherche de la Commission Européenne)

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 79/84

Une première étude compare de manière satisfaisante les résultats expérimentaux à ceux d'une simulation à la chute d'un colis neuf qui a fait l'objet d'un essai réel de chute à l'échelle 1 en 2008 (cf. figures¹⁹ ci-après).



Les résultats de la simulation de l'essai de chute de 2008 sur colis neuf montrent que le colis, post-impact, ne présente pas de fissure traversante à travers le béton de l'enveloppe confinante constituée par la coque et le bouchon de fermeture. On rappelle que le même constat est réalisé sur le colis réel ayant fait l'objet de l'essai de chute de 2008.

Une seconde étude, réalisée en 2022, propose une simulation du même type après intégration de l'évolution à la baisse des performances du béton, tenant ainsi compte des potentiels effets sur ses performances des phénomènes cités précédemment. Deux jeux de données dégradées du béton sont ainsi définis à partir des données disponibles sur le béton neuf :

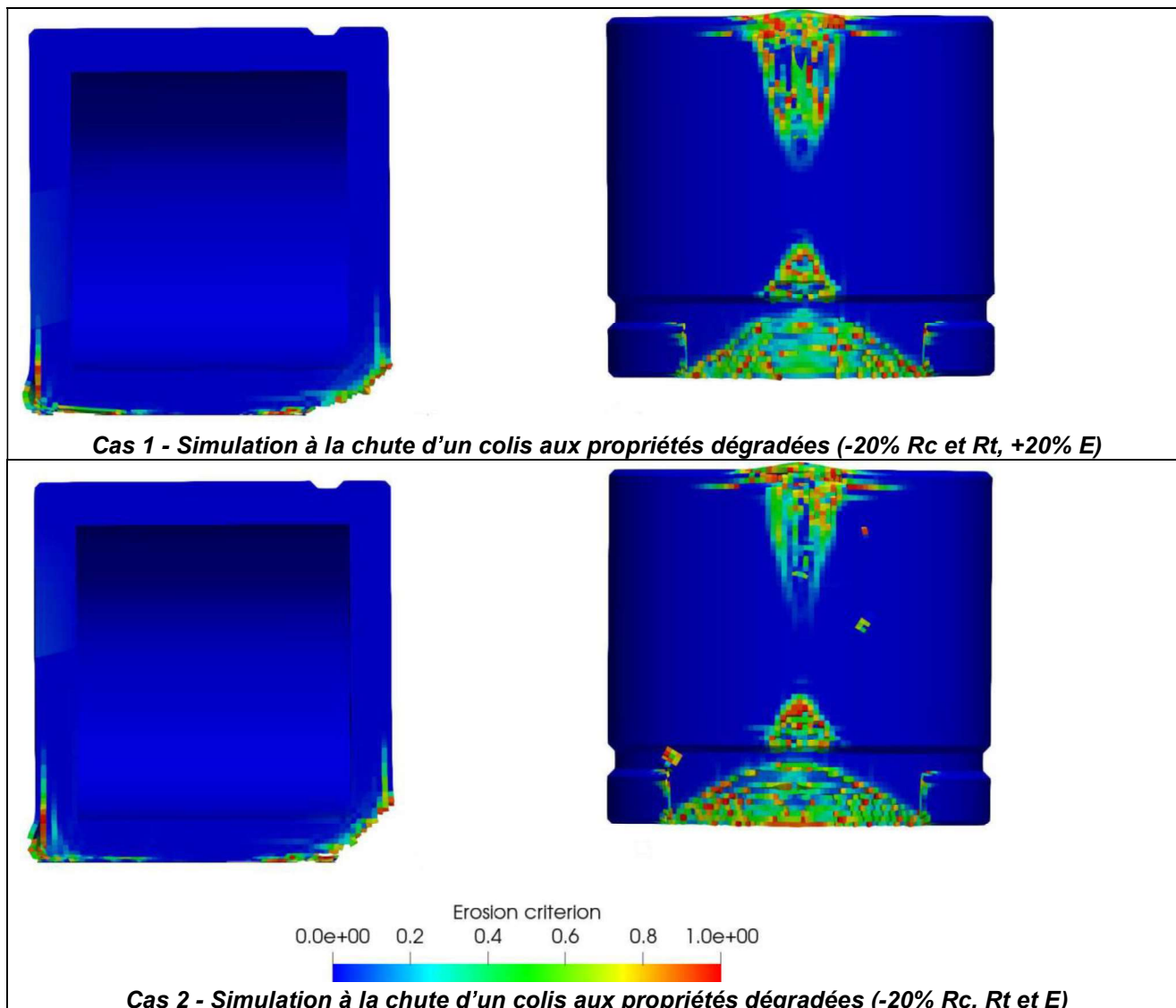
- Révision à la baisse des limites en rupture à la compression et la traction (Rt) de 20%
- Concernant le module d'Young (E), il est difficile de s'avancer sur quelle évolution à la hausse ou à la baisse est la plus pénalisante. Aussi, deux valeurs sont envisagées, à +20% (cas 1 ci-dessous) impliquant un

¹⁹ la figure relative à la simulation numérique a fait l'objet d'une mise à jour suite à une évolution du code et de manière à respecter une cohérence avec les calculs également présentés à partir de données béton tenant compte d'un effet de l'entreposage sur plusieurs décennies.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
	DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0

matériau plus raide mais plus cassant, à -20% (cas 2 ci-dessous) impliquant un matériau moins raide et plus apte à absorber les déformations plastiques.

Les principaux résultats de cette étude sont présentés ci-après :



Les dégradations constatées numériquement sur chacun des trois calculs réalisés (colis neuf, colis « vieilli » cas 1 et colis « vieilli » cas 2) démontrent qu'une réduction du module d'Young est plus pénalisante. Ces dégradations peuvent être résumées par les grandeurs dimensionnelles des zones endommagées de la manière suivante :

	Longueur de la zone d'impact (mm)	Hauteur de la zone d'impact (mm)	Observation de fissure traversante
Essai de chute sur colis réel à l'échelle 1	630	210	Non
Colis neuf	870	265	Non
colis « vieilli » cas 1	837	218	Non
colis « vieilli » cas 2	884	290	Non

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 81/84

En définitive, l'approche qualitative numérique à l'aide du code EUROPLEXUS permet d'une part de caractériser le caractère enveloppe des simulations réalisées lorsque l'on compare les résultats expérimentaux de chute d'un colis à l'échelle 1 aux résultats numériques sur colis neuf. **Ce caractère enveloppe appliqué à des caractéristiques dégradées de 20% du modules d'Young et des résistances en compression et traction permet de justifier de la tenue à la chute d'un colis à l'issue de sa période d'entreposage sur ICEDA sans observation de fissure traversante.**

Un ou plusieurs colis confectionnés au cours des essais inactifs d'ICEDA (donc sans Becquerel en présence) sont néanmoins conservés en hall, si besoin, afin de les faire « vieillir » dans les conditions d'entreposage et les soumettre à des essais de chute à des échéances futures 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 applicables aux colis C1PG^{SP} MAVL et la dose estimée à l'exutoire, même pour des relâchements considérés comme labile quelques centaines d'années après la fermeture du stockage. Sur le plan qualitatif, EDF propose de manière pénalisante, au-delà de 300 ans, un modèle simple de relâchement des radionucléides sans tenir compte des récentes études proposant des résultats plus réalistes basés sur des évaluations des vitesses de corrosion des déchets métalliques en conditions de stockage (milieu cimentaire, température).

7.1 FAMILLE DE COLIS EDF-080 ET EDF-100 : COLIS C1PG DE DAE ET DAD REP

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

L'enveloppe externe en béton du colis valorisée pendant 300 ans est prise 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 to + 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 et de la sûreté après fermeture de CIGEO, soit très pénalisante si elle conduit, dans le même temps, à considérer comme phénomène induisant le relâchement des RN à to+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'essais en conditions thermiques et chimiques (coulis cimentaire) et d'étude a été conduit (cf. § 6.4) 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.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 82/84

Les résultats d'essais de corrosion de déchets représentatifs pénalisants (ie. crayons inox et crayons AIC du palier 900 MW), associés à des surfaces spécifiques enveloppe de celles des déchets des familles EDF-080 et EDF-100, permettent d'estimer la production d'hydrogène de corrosion métallique de ces déchets dans les colis correspondants. Ces résultats associés à l'étude de radiolyse démontrent un pic de production d'hydrogène dans les colis estimé au pire à 40 litres/an/colis pour un critère d'acceptation fixé par l'Andra à 60 litres/an/colis à réception à CIGEO (cf. § 6.5.3). 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 1^{ÈRE} GÉNÉRATION

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 associées à cette famille.

En conséquence, EDF propose de considérer une disponibilité complète des radionucléides en présence, après 300 ans, 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 PROCÉDE 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 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 / 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 est complétée sur l'installation ICEDA par les essais préliminaires (ie. matériels un à un), les essais fonctionnels, les essais d'ensemble, les essais de performances en inactif :

- Les essais préliminaires : vérifier la fonctionnalité de chacun des équipements et matériels,
- Les essais fonctionnels spécifiques à chaque type d'équipement/installation, de manière non exhaustive : contrôles d'inter-verrouillages internes à la machine – contrôles de report de positions, de défauts et d'alarmes, interne à la machine – essais d'adressage et d'automatisme à blanc – vérifications de

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 83/84

fonctionnement des matériels – vérifications de fonctionnement d’asservissement et de sécurités – mesures de caractéristiques électriques ou aéraulique – réglages de débit, pression, température – contrôles de pré-réglages des actionneurs, des capteurs et de l’instrumentation – essais de mouvement unitaire – essais fonctionnels de l’ensemble de l’installation – qualifications contractuelles et essais règlementaires – modes de marche dégradée, etc...

- Les essais d’ensemble dits essais inter-lots : valider le fonctionnement des procédés de chaque cotraitant aux interfaces.
- Les essais d’ensemble dits essais de missions : tester, par séquences, les essais de performance de l’ensemble des procédés de tous les cotraitants. Ces essais permettent de valider le fonctionnement, par séquences et par fonctions, de l’installation.
- Les essais de performance en inactif : ces essais, réalisés sur une installation opérationnelle, visent à démontrer l’aptitude de l’installation à respecter les exigences de performance du contrat. Ils sont réalisés en configuration normale d’exploitation, en respectant toutes les exigences de traçabilité des colis, de contrôle et de mesure, qui sont à mettre en œuvre par chacun des postes de travail définis et nécessaires à cette exploitation.

A réception de l’autorisation de l’ASN de produire des colis sur ICEDA, cette qualification intègre enfin les résultats des essais en actif :

- Les essais de performance en actif : mêmes objectifs avec en complément l’aptitude à respecter les exigences de sûreté liées à l’introduction du 1ier Becquerel.

Conformément à la Décision n°2020-DC-00691 de l’Autorité de Sûreté Nucléaire du 28 juillet 2020 autorisant la mise en service de l’ICEDA, un rapport de synthèse des essais de démarrage a été remis à l’ASN en application de l’Art. R.593-34 du décret n° 2019-190 du 14 mars 2019 codifiant les dispositions applicables aux installations nucléaires de base, au transport de substances radioactives et à la transparence en matière nucléaire.

	RÉFÉRENTIEL DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS MAVL - PIÈCE 2 : PROGRAMME DE QUALIFICATION DES COLIS C1PGSP - VERSION PUBLIQUE		
DP2D_FD-DP2D	Référence : D455524009198	Indice : 0	Page 84/84

ANNEXE 1 – PLAN DU CONTENEUR C1PG^{SP}

[]