

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Projet de stockage Cigéo – Examen du Dossier d’Options de Sûreté

RAPPORT IRSN N° 2017-00013

TOME 2

Réunion des Groupes permanents d’experts pour les déchets
et pour les laboratoires et les usines des 18-19 mai 2017

SOMMAIRE

Tome 1	1
INDEX DES FIGURES	12
INDEX DES TABLEAUX	17
1 Introduction	19
1.1 <i>Objet du présent rapport</i>	19
1.2 <i>Présentation du Dossier</i>	21
1.3 <i>Contexte</i>	21
2 Description de Cigéo	29
2.1 <i>Le site de Meuse/Haute-Marne</i>	29
2.2 <i>L'architecture du stockage</i>	31
2.2.1 Installations de surface	32
2.2.1.1 Installations de surface de la zone puits	33
2.2.1.2 Installations de surface de la zone descenderie	33
2.2.2 Liaisons surface-fond	35
2.2.2.1 Descenderies	35
2.2.2.2 Puits	36
2.2.3 Installation souterraine, concepts de stockage	36
2.2.3.1 Zone de stockage et alvéoles MAVL	38
2.2.3.2 Zones de stockage et alvéoles HAO et HA1/HA2	40
2.3 <i>Les colis</i>	43
2.3.1 Les colis de déchets HA	43
2.3.2 Les colis de déchets MAVL	45
2.4 <i>Calendrier de Cigéo</i>	47
2.4.1 Construction initiale	47
2.4.2 Phase pilote	47
2.4.3 Exploitation courante	48
2.5 <i>Fermeture du stockage</i>	48
2.5.1 Opérations de fermeture	48
2.5.2 Ouvrages de fermeture	49
2.5.2.1 Bouchons d'alvéole HA	49
2.5.2.2 Fermeture des alvéoles MAVL	50
2.5.2.3 Scelllements de galeries horizontales	50
2.5.2.4 Scelllements de liaisons surface-fond	52
2.6 <i>Procédés mis en oeuvre dans les installations</i>	53

2.6.1	Procédés dans l'installation nucléaire de surface EP1	53
2.6.1.1	Description du procédé	53
2.6.1.2	Ventilation	57
2.6.2	Procédés dans la descenderie colis	58
2.6.3	Procédés dans l'installation souterraine	58
2.6.4	Séparation des procédés « exploitation » et « travaux »	64
2.7	<i>Adaptabilité de Cigéo à une évolution de l'inventaire (réserves et combustibles usés)</i>	66
2.7.1	Colis de stockage des déchets en réserves et des combustibles usés	66
2.7.1.1	Déchets en réserves	66
2.7.1.2	Combustibles usés	67
2.7.2	Adaptabilité de l'architecture de Cigéo aux déchets en réserves	68
2.7.3	Adaptabilité de l'architecture de Cigéo aux combustibles usés	69
2.8	<i>Fonctions de sûreté</i>	72
2.8.1	Phase d'exploitation	73
2.8.2	Phase après fermeture	75
2.8.3	Intégration dans l'évaluation de sûreté	77
3	Inventaire des colis de déchets	79
3.1	<i>Inventaire des colis</i>	79
3.1.1	Evolutions par rapport au PIGD indice A	80
3.1.2	Hypothèses de l'inventaire du PIGD	81
3.1.2.1	Caractéristiques des assemblages combustibles à décharger	82
3.1.2.2	Durée d'exploitation des réacteurs du parc électronucléaire et production électrique nette future	82
3.1.3	Description des colis	83
3.1.4	Marges	88
3.1.5	Caractéristiques dimensionnantes	90
3.1.6	Spécifications d'acceptation des colis primaires	92
3.2	<i>Inventaire radiologique de référence</i>	94
3.2.1	Etat des lieux des connaissances – Données de base	94
3.2.2	Démarche de construction de l'inventaire radiologique	95
3.3	<i>Inventaire chimique de référence</i>	97
3.4	<i>Chroniques de stockage</i>	97
3.4.1	Options de stockage des colis MAVL	98
3.4.2	Principe d'ordonnement de livraison des colis primaires	100
3.4.3	Ordonnement de livraison des colis primaires	101
3.5	<i>Déchets en réserve</i>	103
3.5.1	Conditionnement des déchets et inventaire des colis	104
3.5.2	Inventaire radiologique	106
3.5.3	Inventaire chimique	107

3.6	<i>Combustibles usés</i>	108
3.6.1	Scénarios et typologies de combustibles usés	108
3.6.2	Concepts et inventaire des colis	109
3.6.3	Puissance thermique des colis	111
3.6.4	Inventaires radiologique et chimique	111
3.7	<i>Conclusion</i>	111
4	Connaissance du site de Meuse/Haute-Marne	113
4.1	<i>Contexte géologique</i>	113
4.2	<i>Ressources naturelles</i>	114
4.2.1	Ressource géothermale	115
4.2.2	Ressources en hydrocarbures	116
4.3	<i>Evolution géodynamique du site</i>	118
4.4	<i>Caractérisation géotechnique de surface</i>	120
4.5	<i>La roche hôte</i>	121
4.5.1	Propriétés géologiques	121
4.5.2	Paramètres hydrodynamiques	124
4.5.3	Propriétés de transport	128
4.5.4	Propriétés mécaniques	132
4.5.4.1	Comportement géomécanique du Callovo-Oxfordien	132
4.5.4.2	Caractérisation géotechnique du Callovo-Oxfordien	140
4.6	<i>Hydrogéologie des couches aquifères</i>	143
4.6.1	Caractérisation et conceptualisation des couches aquifères du secteur de Meuse/Haute-Marne	143
4.6.1.1	Barrois	143
4.6.1.2	Oxfordien	145
4.6.1.3	Dogger	150
4.6.1.4	Trias	153
4.6.2	Hydrogéochimie des aquifères	153
4.6.3	Modèle conceptuel hydrogéologique	155
4.6.4	Modélisation numérique des écoulements souterrains	156
4.6.4.1	Modélisation numérique des écoulements souterrains « à l'actuel »	156
4.6.4.2	Modélisation numérique des écoulements souterrains « géoprospectifs »	163
5	Evolution des composants du stockage	167
5.1	<i>Comportement des colis après fermeture du stockage</i>	167
5.1.1	Conteneurs de stockage	167
5.1.2	Démarche d'établissement des modèles de relâchement	168
5.1.3	Colis de déchets salins non bitumés	169
5.1.3.1	Phénoménologie d'altération des sels non bitumés	169
5.1.3.2	Modèles de relâchement et paramètres associés	170

5.1.4	Colis de déchets salins bitumés	170
5.1.4.1	Phénoménologie d'altération des déchets salins bitumés	170
5.1.4.2	Modèles de relâchement et paramètres associés	171
5.1.5	Problématique des gonflements liés aux déchets salins bitumés et non bitumés	172
5.1.6	Colis de déchets métalliques	173
5.1.6.1	Phénoménologie d'altération des déchets métalliques	174
5.1.6.2	Modèles de relâchement et paramètres associés	175
5.1.7	Colis de déchets vitrifiés HA	176
5.1.7.1	Comportement intrinsèque du verre	177
5.1.7.2	Phénoménologie d'altération des déchets vitrifiés HA	177
5.1.7.3	Modèles de relâchement et paramètres associés	182
5.1.8	Colis de déchets vitrifiés MAVL	186
5.1.8.1	Comportement intrinsèque du verre	186
5.1.8.2	Phénoménologie d'altération des déchets vitrifiés MAVL	186
5.1.8.3	Modèles de relâchement et paramètres associés	187
5.1.9	Autres colis de déchets	188
5.1.10	Déchets en réserve	190
5.1.11	Combustibles usés	190
5.1.11.1	Phase de relâchement instantané	191
5.1.11.2	Phase de relâchement différé	193
5.2	<i>Evolution des aciers</i>	195
5.2.1	Corrosion des aciers	196
5.2.2	Pré-dimensionnement du conteneur de stockage	200
5.2.3	Pré-dimensionnement du chemisage	202
5.3	<i>Evolution des bétons</i>	203
5.3.1	Bétons bas pH	203
5.3.2	Perturbation saline par les colis de déchets MAVL	207
5.4	<i>Evolution des matériaux argileux</i>	210
5.4.1	Transitoire thermo-hydrémécanique	210
5.4.2	Transitoire hydraulique- gaz	213
5.4.3	Transitoires chimiques	218
5.4.3.1	Perturbation alcaline par les bétons	219
5.4.3.2	Perturbation saline par les déchets salins MAVL	220
5.4.3.3	Perturbation organique par les déchets MAVL	223
5.4.3.4	Réactivité de l'hydrogène de corrosion et de radiolyse	225
5.4.3.5	Impact des bactéries	226
	REFERENCES	228
	LISTE DES ACRONYMES	239

Tome 2	1
INDEX DES FIGURES	8
INDEX DES TABLEAUX	13
6 Démarche de sûreté	15
6.1 Démarche de sûreté pour la phase d'exploitation	15
6.1.1 Objectifs de protection contre les rayonnements ionisants	15
6.1.2 Principes de la démarche de sûreté	16
6.1.3 Situations de dimensionnement, de dimensionnement du PUI et exclues	17
6.1.3.1 Définition des différentes situations de fonctionnement	17
6.1.3.2 Méthodologie d'identification et de classement des différentes situations	20
6.1.4 Scénarios de cumul et ECS	23
6.1.5 EIP et AIP	26
6.1.5.1 Les EIP	26
6.1.5.2 Les AIP	27
6.1.5.3 Qualification des EIP	27
6.1.5.4 Exigences définies	28
6.1.6 Situations post-accidentelles	28
6.1.7 Surveillance	30
6.2 Démarche de sûreté pour la phase après fermeture	32
6.2.1 Démarche d'identification et de classification des scénarios	32
6.2.2 Définition du domaine d'évolution normale	33
6.2.3 Scénarios d'évolution altérée	35
6.2.4 Démarche de sélection des biosphères	38
7 Evaluation de sûreté en phase d'exploitation	41
7.1 Risques internes d'origine nucléaire	41
7.1.1 Exposition interne et externe	41
7.1.1.1 Exposition interne	41
7.1.1.2 Exposition externe	42
7.1.1.3 Démarche d'optimisation	43
7.1.1.4 Adaptabilité de Cigéo aux combustibles usés et aux déchets en réserve	44
7.1.1.5 Dispositions de surveillance de l'ambiance radiologique et de contrôle de non contamination	45
7.1.2 Dissémination de substances radioactives	47
7.1.2.1 Premier système de confinement	47
7.1.2.2 Deuxième système de confinement	49
7.1.2.3 Confinement dynamique	50
7.1.2.4 Dispositions de surveillance du confinement	53
7.1.3 Criticité	55
7.1.3.1 Installations de surface, liaisons surface-fond et installation souterraine	55
7.1.3.2 Adaptabilité de Cigéo aux déchets en réserve	59

7.1.3.3	Adaptabilité de Cigéo aux combustibles usés	59
7.1.4	Thermique	63
7.2	<i>Agressions d'origine interne</i>	64
7.2.1	Incendie	64
7.2.1.1	Démarche	64
7.2.1.2	Situations enveloppes de dimensionnement	67
7.2.1.3	Situations de dimensionnement du PUI	69
7.2.1.4	Situations exclues	70
7.2.1.5	Dispositions de protection contre l'incendie	71
7.2.1.6	Conduite de la ventilation en situation d'incendie	74
7.2.1.7	Cas spécifique des enrobés bitumineux en alvéole MAVL	76
7.2.2	Explosion	85
7.2.2.1	Risque d'explosion lié à l'hydrogène de radiolyse en exploitation	85
7.2.2.2	Risque d'explosion lié à l'hydrogène de radiolyse lors des opérations de fermeture et de réouverture des alvéoles MAVL	89
7.2.2.3	Risque d'explosion lié à l'hydrogène de corrosion	89
7.2.2.4	Autres risques d'explosion	90
7.2.3	Transport et manutention des colis	91
7.2.3.1	Opérations de transport de colis de déchets en surface à l'extérieur des bâtiments	92
7.2.3.2	Opérations de manutention dans les installations	93
7.2.4	Retrait des colis et opérations de réouverture	100
7.2.4.1	Retrait des colis avant ou après opérations de fermeture	100
7.2.4.2	Opérations liées à la réouverture et stratégie de fermeture	108
7.2.5	Inondation d'origine interne	111
7.2.6	Activités humaines	112
7.2.7	Coactivité	118
7.2.8	Perte d'auxiliaires	123
7.2.9	Vieillessement et maintenance	124
7.3	<i>Agressions d'origine externe</i>	127
7.3.1	Séismes	127
7.3.1.1	Détermination de l'aléa sismique pour la phase d'exploitation	127
7.3.1.2	Dimensionnement sismique de Cigéo	130
7.3.2	Inondation externe	131
7.3.2.1	Installations de surface	131
7.3.2.2	Installation souterraine	134
7.3.3	Aléas météorologiques (installations de surface)	137
7.3.4	Risques liés à l'environnement industriel, aux voies de communication et à la chute d'aéronef (installations de surface)	141
7.4	<i>Effluents et déchets d'exploitation</i>	144
7.4.1	Gestion des effluents et déchets	144

7.4.2	Surveillance des eaux de surface et souterraines	145
7.5	<i>Evaluations d'impact</i>	148
7.5.1	Situations de dimensionnement	148
7.5.1.1	Evaluation des conséquences des situations incidentelles et accidentelles sur les travailleurs	148
7.5.1.2	Evaluation de l'impact sanitaire en situation de dimensionnement	148
7.5.1.3	Evaluation de l'impact environnemental en situation de dimensionnement	150
7.5.2	Situations de dimensionnement du PUI	150
8	Evaluation de sûreté en phase après fermeture	153
8.1	<i>Analyse des risques dans les installations souterraines</i>	153
8.1.1	Risque d'origine interne : criticité	153
8.1.2	Risque d'origine externe : séismes	153
8.1.2.1	Analyse déterministe	154
8.1.2.2	Évaluation probabiliste de l'aléa sismique	159
8.1.2.3	Conséquences de l'occurrence de séismes après fermeture	161
8.2	<i>Evaluation de la capacité globale de confinement</i>	162
8.2.1	Domaine d'évolution normale	162
8.2.1.1	Inventaire radiologique à terminaison	162
8.2.1.2	Principaux paramètres du scénario d'évolution normale	164
8.2.1.3	Transferts dans les encaissants du Callovo-Oxfordien et identification des exutoires	165
8.2.1.4	Enseignements des évaluations de performance et de l'impact associés au scénario d'évolution normale	166
8.2.2	Scénarios d'évolution altérée et What-if	175
8.2.3	Etude de sensibilité à l'architecture du stockage	180
8.2.4	Bilan des études de sensibilité à l'architecture du stockage	183
8.2.5	Scénarios d'intrusion humaine involontaire	185
8.2.6	Prise en compte des combustibles usés et des réserves	189
9	Conclusion générale	191
	RECOMMANDATIONS	193
	REFERENCES	195
	LISTE DES ACRONYMES	205

INDEX DES FIGURES

Figure 1 : Carte géologique du « secteur de MHM » et position de la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA) dans la zone de transposition (ZT) (source Andra [53], modifiée).....	29
Figure 2 : Logs des principales formations géologiques du secteur de MHM. À gauche : couches du Mésozoïque. À droite : détail de la formation du Callovo-Oxfordien au niveau du Laboratoire souterrain [40].....	30
Figure 3 : Schéma de l'installation Cigéo comprenant les installations de surface et souterraine [39].....	32
Figure 4 : Schéma des périmètres des installations de la zone puits [39]	33
Figure 5 : Bâtiments de l'installation EP1 [39]	34
Figure 6 : Descenderies [39].....	35
Figure 7 : Localisation des puits dans l'installation souterraine [39]	36
Figure 8 : Architecture à terminaison de l'installation souterraine [40]. Flèche rouge : direction de la contrainte principale (Nord-Nord-Ouest); flèche verte : direction du pendage des couches (Ouest-Nord-Ouest).....	37
Figure 9 : Schéma de la zone de soutien logistique Exploitation [39]	37
Figure 10 : Schéma de la zone de stockage MAVL en fin de remplissage du quartier [39].....	38
Figure 11 : Schéma d'un alvéole MAVL [39].....	39
Figure 12 : Section type d'alvéole MAVL CS1, avec soutènement, revêtement et béton de remplissage.	40
Figure 13 : Schéma de la zone de stockage HA1/HA2 à terminaison [39]	40
Figure 14 : Schéma d'un alvéole HA [39].....	41
Figure 15 : Coupe d'alvéole HA de type « AVM » chargée.....	42
Figure 16 : Bouchon d'exploitation HA [39].....	43
Figure 17 : Illustration d'un conteneur de stockage HA pour colis primaire de déchets vitrifiés de type R7T7 [39]...	44
Figure 18 : Modèles de colis de stockage HA [39]	45
Figure 19 : Illustration d'un conteneur de stockage MAVL en béton (CS4) à couvercle vissé accueillant quatre colis primaires [39].....	46
Figure 20: Modèles de colis de stockage MAVL [39]	46
Figure 21 : Représentation des ouvrages souterrains de la tranche T1 [41]	47
Figure 22 : Schéma de fermeture de l'alvéole MAVL : illustration des scellements, au stade de fin d'APS [39]. Lors de l'exploitation : radiers et bétons de coffrage en blanc, béton de revêtement en gris foncé. Lors de la fermeture : béton de remplissage en gris clair, matériau argileux de scellement en orange.	50
Figure 23 : Schémas de principe des deux options de scellements horizontaux [39]	51
Figure 24 : Localisation des scellements dans l'installation souterraine (cercles rouges) [39]	52
Figure 25 : Schémas de principe des scellements verticaux et inclinés des liaisons surface-fond [39]	53

Figure 26 : Schéma de principe de réception, de contrôle « C3 » et de basculement des emballages de transport verticaux [39]. (DDD : débit de dose)	53
Figure 27 : Schéma de principe de déchargement des emballages de transport verticaux et contrôle « C5 » [39]....	54
Figure 28 : Schéma de principe de déchargement des emballages de transport horizontaux et contrôle « C5 » [39].	54
Figure 29 : Schéma de principe de conditionnement de colis de stockage HA [39].....	55
Figure 30 : Schéma de principe de mise en hotte de colis de stockage HA [39]	56
Figure 31 : Schéma de principe de mise en hotte de colis de stockage MAVL [39]. En jaune, Machine à Levage Limité, qui soulève les hottes et les translate au ras du sol.	56
Figure 32 : À gauche, hotte MAVL (type 1) en vue éclatée. À droite, hotte HA en position de retrait du bouchon [39]. MLL : Machine à Levage Limité.....	57
Figure 33 : Schéma de principe du transfert incliné (haut) et illustration du funiculaire (bas) [39]	58
Figure 34 : Chariot de transfert des hottes [39]	59
Figure 35 : Tables tournantes [39].....	59
Figure 36 : Navette d'accostage MAVL [39]	60
Figure 37 : Table et façade d'accostage d'un alvéole MAVL [39]	60
Figure 38 : Table de réception de colis de stockage MAVL [39]	60
Figure 39 : Pont stockeur avec colis (position premier niveau) [39]	61
Figure 40 : Chariot stockeur [39]	61
Figure 41 : Robot pousseur HA et sa hotte [39].....	62
Figure 42 : Robot de retrait HA et sa hotte [39][42]	62
Figure 43 : Schéma de principe de la ventilation de l'installation souterraine [39]	63
Figure 44 : Principe de développement de l'installation souterraine [98]	64
Figure 45 : Principe de séparation des activités dans le quartier de stockage MAVL [39]	65
Figure 46 : Principe de séparation physique dans les galeries [39]. Les sas ne sont empruntés que par les services de secours en situation accidentelle, uniquement en cas de besoin.	66
Figure 47 : Conteneur de stockage CS4 retenu pour les déchets de graphite [48].....	67
Figure 48 : Installation souterraine avec stockage des déchets en réserves [48]	69
Figure 49 : Hotte blindée de transfert de colis de stockage multi-assemblages [47].....	70
Figure 50 : Coupe transversale des gabarits de passage des hottes de transfert combustibles et MAVL dans la descendrie [47]	70
Figure 51 : Exemple d'architecture de l'installation souterraine avec stockage des combustibles usés [47].....	71

Figure 52 : Modèles de surrection tectonique de 2008 (gauche) dit « maximaliste » et de 2011 (droite) dit « réaliste » [53].....	119
Figure 53 : Schéma de la zone endommagée initiale créée par l'excavation dans les unités argileuse (UA) et silto-carbonatée (USC) du Callovo-Oxfordien [40].....	132
Figure 54 : Schémas relatifs à l'expérimentation CDZ (auto-colmatage de l'EDZ) [212]	135
Figure 55 : Estimation des extensions horizontale et verticale de la zone de roche foisonnée (ZF) et de la zone de roche fracturée connectée (ZFC) à partir de la paroi excavée, en fonction du taux de vide [40]. Le taux de foisonnement pris en compte est de 10 % (transmis au cours de l'instruction).	139
Figure 56 : Esquisses piézométriques des calcaires du Barrois en période de basses eaux. A gauche, calcaires sublithographiques ; à droite, calcaires de Dommartin [73].	145
Figure 57 : Coupe Est-Ouest de la géométrie des couches de l'Oxfordien (marnes de la Série grise et horizons producteurs) passant dans la partie Sud de la ZIRA, avec les altitudes en mètres (Z) selon les repères géographiques en Lambert III (X) [39]. Limites des couches représentées dans le modèle numérique de l'Andra en traits gris, sur lesquelles sont placées les couches des horizons producteurs Hp1-Hp4 en bleu, Hp5 en jaune et Hp6-Hp7 en violet, les Marnes inférieures à moyennes en rouge et les Marnes supérieures en orange.	147
Figure 58 : Représentation de la Série grise dans le modèle numérique de l'Andra. A gauche : carte de l'extension des Marnes inférieures à moyennes en gris clair et des Marnes supérieures en gris foncé (double flèche : position de la coupe en Figure 57). A droite : vue 3D des épaisseurs (mètres) des Marnes inférieures à moyennes en haut et des Marnes supérieures en bas (Andra, transmis au cours de l'instruction)	147
Figure 59 : Esquisses piézométriques de l'Oxfordien moyen (gauche) et de l'Oxfordien supérieur (droite) [53]	148
Figure 60 : Esquisse piézométrique du Dogger [53]	151
Figure 61 : Failles majeures retenues à l'échelle du secteur de MHM (échelle de couleur pour les failles jouant un rôle drainant : perméabilités en 10^x m/s ; en gris : failles dont la perméabilité a été réduite, jouant un rôle de barrière hydraulique) [88]	160
Figure 62 : Comparaison entre charges hydrauliques mesurées (gauche) et simulées (droite). a- Oxfordien supérieur ; b- Oxfordien moyen ; c- Dogger [53][88]	161
Figure 63 : Trajectoires du panache de particules dans l'Oxfordien moyen (gauche) et dans le Dogger (droite) [88]	162
Figure 64 - Directions et temps de transfert, dans l'Oxfordien à gauche et dans le Dogger à droite, au bout de 1 Ma de simulation dans le modèle d'évolution géomorphologique « <i>maximaliste</i> » [88]. Les flèches blanches indiquent les exutoires.	164
Figure 65 - Directions des particules, dans l'Oxfordien à gauche et dans le Dogger à droite, dans la configuration à l'actuel (jaune) et en configuration géoprospective à 1 Ma (vert) dans le modèle d'évolution géomorphologique « <i>phénoménologique</i> » [88]. Les flèches blanches indiquent les exutoires.	165
Figure 66 : Illustration des différents régimes d'altération du verre sous eau au cours du temps [40].....	178

Figure 67 : Illustration de l'évolution de la vitesse d'altération du verre et de la vitesse de relâchement des radionucléides et toxiques chimiques en fonction du temps [40]	180
Figure 68 : Terme source total issu des colis de stockage de combustibles usés et sensibilité aux paramètres utilisés dans les modèles de relâchement instantané (IRF) et différé.	194
Figure 69 : Sensibilité de l'espacement entre alvéoles HA au module d'Young (E) et à la perméabilité (K) du Callovo-Oxfordien - fin d'APS : cas des alvéoles HA2 avec une période d'entreposage de 85 ans (contraintes positives en traction) (d'après Andra ; commentaires IRSN)	211
Figure 70 : Concept de fermeture de l'alvéole HA (d'après Andra)	212
Figure 71 : Voies de transfert de l'hydrogène à l'échelle du stockage (bilan massique) (d'après Andra)	214
Figure 72 : Méthodologie d'identification et de classement des situations de dimensionnement et des situations hors dimensionnement [97].....	21
Figure 73 - Choix des hypothèses et des données pour les situations « <i>de référence</i> » et « <i>enveloppe</i> » (transmis par l'Andra au cours de l'instruction).....	34
Figure 74 : Alimentation électrique du pont stockeur en alvéole MAVL [42]	103
Figure 75 : Positionnement des « acteurs FOH » dans l'organisation du projet Cigéo [44]	113
Figure 76 : Comparaison des spectres SMS proposés par l'Andra. En vert (SDD) : spectre de dimensionnement issu de l'évaluation probabiliste de 2005, retenu au stade du DOS. En noir : SMF. En violet : analyse de sensibilité aux incertitudes sur le SMS évalué par méthode déterministe en vue de la DAC. Le spectre SMS « médian » couvre par définition 50 % des valeurs obtenues en prenant en compte les incertitudes.	129
Figure 77 : Arbre logique déterministe considéré par l'Andra pour le calcul du niveau SMPP sur le site de Cigéo [108]. Branche 1 : « <i>modèle structural régional</i> » ; branche 2 : « <i>modèle structural régional</i> ».	155
Figure 78 : « Spectre SMPP 2004 » de référence au stade du DOS (en noir) et spectres étudiés pour la DAC, pour la localisation « descenderies » : évaluation déterministe (en orange) avec étude de sensibilité aux centiles 16, 50 et 84 % et spectres (valeurs moyennes) obtenus pour les 3 « sources » retenues ; évaluation probabiliste UHRS à 60 000 ans (en vert) aux centiles 16, 50 et 84 % [108].	157
Figure 79 : Débits molaires au cours du temps au toit du Callovo-Oxfordien et en sortie des liaisons surface-fond pour l' ¹²⁹ I pour les SEA de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture (à gauche) et les scénarios <i>What-if</i> de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture (à droite) (les valeurs de paramètres retenues pour caractériser les autres composants du stockage sont celles de la situation « <i>de référence</i> » du SEN).....	177
Figure 80 : Débits molaires au cours du temps au toit du Callovo-Oxfordien et en sortie des liaisons surface-fond pour l' ¹²⁹ I pour les SEA de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture (à gauche) et les scénarios <i>What-if</i> de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture (à droite) (les valeurs de paramètres retenues pour caractériser les autres composants du stockage sont celles de la situation « <i>enveloppe</i> » du SEN).....	177
Figure 81 : Débits molaires au cours du temps au toit et au mur du Callovo-Oxfordien en situation « <i>enveloppe</i> » (de gauche à droite : SEN, SEA de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture (tous scellements défailants), Scénario <i>What-if</i> de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture (tous scellements défailants))	178

Figure 82 : Influence de la longueur des galeries de liaison - SEN et *What-if* 3 en situation « de référence », quartier MAVL, 129I : débits molaires au niveau des indicateurs intermédiaires et sortant des ouvrages de liaison surface-fond (en rouge) et du Callovo-Oxfordien (en vert). (Andra, [123]). Le modèle JAPS05 correspond au modèle utilisé dans les évaluations d'impact présentées dans le DOS ($L_{ref} \approx 300$ m). Les modèles GALZP-2 ($L_{ref}+200$ m) et GALZP-2 ($L_{ref}+400$ m) postulent des allongements de galerie respectivement de 200 m et 400 m.....182

Figure 83 : Localisations possibles des forages par rapport au système de stockage et aux panaches de radionucléides [40].....186

Figure 84 : Représentation des situations de forages retenus pour l'évaluation de sûreté après fermeture à l'échéance de la DAC [40]188

INDEX DES TABLEAUX

Tableau 1 : Fonctions du colis de stockage MAVL en phase d'exploitation [39].....	74
Tableau 2 : Fonctions du colis de stockage HA en phase d'exploitation [39].....	75
Tableau 3 : Inventaire des colis primaires de déchets HA et MAVL du PIGD-D [162]	79
Tableau 4 : Inventaires des colis primaires de déchets HA et MAVL du PIGD-D [162] et du PIGD-A [161]	80
Tableau 5 : Niveaux de connaissance retenus pour déterminer l'inventaire de référence et facteurs de marge associés [40]	96
Tableau 6 : Déchets FAVL mis en réserve [48]	105
Tableau 7 : Déchets mis en réserve correspondant au fonctionnement et au démantèlement d'un réacteur EPR supplémentaire [48]	106
Tableau 8 : Radionucléides de période supérieure à 100 ans dont l'activité dans le stockage augmenterait de plus de 3 % avec l'accueil des déchets en réserve [48]	107
Tableau 9 : Dimensions et masses des colis de stockage de combustibles usés [47]	110
Tableau 10 : Nombre de colis primaires de combustibles usés et de colis de stockage associés	110
Tableau 11 : Profondeur estimée (en m) par l'Andra des niveaux stratigraphiques recherchés au niveau Laboratoire souterrain (EST210), du barycentre des puits de Cigéo et à l'aplomb du milieu de la zone HA sur la ZIRA. UT, UA1, UA2, UA3 : cf. Figure 2.....	121
Tableau 12 : Perméabilités verticales (Kv) et horizontales (Kh) du Callovo-Oxfordien	125
Tableau 13 : Résultats du calage Andra (modèle « de référence »)	158
Tableau 14 : Paramètres retenus en référence pour les déchets métalliques dans le cas où le modèle par corrosion est applicable [92]	176
Tableau 15 : Taux de relâchement (%) retenu pour les radionucléides contribuant à l'IRF(t=0) - valeurs moyennes (valeurs pénalisantes)	192
Tableau 16 : Taux de relâchement (%) retenu pour l' ¹²⁹ I contribuant à l'IRF(t=0) - valeurs moyennes (valeurs pénalisantes)	192
Tableau 17 - Objectifs de protection contre les rayonnements ionisants (Andra, transmis au cours de l'instruction) 15	
Tableau 18 : Définition de la robustesse des dispositions pour chaque type de ligne de défense [97]	20
Tableau 19 : Délais d'atteinte du critère de température en peau de fût	81
Tableau 20 - délai d'atteinte d'une concentration de 75 % de la LIE pour un débit de 40 L/colis de stockage/an (Andra, [39]).....	86
Tableau 21 : Températures extrêmes présentées par l'Andra.....	138
Tableau 22 : Données retenus par l'Andra pour l'aléa vent extrême.....	139

Tableau 23 : Données retenus par l'Andra pour l'aléa tornade.	140
Tableau 24 : Probabilités annuelles de chute pour chaque cible et chaque famille d'aéronef [39]	143
Tableau 25 : Caractéristiques considérées pour établir les spectres SMPP du modèle par faille (branche 1 de l'arbre logique de la Figure 77) [108].	156
Tableau 26 : Calcul IRSN des temps de retour « TR » d'un aléa considéré en fonction de la durée de vie cible « Dv » d'une installation et de la probabilité de dépassement « Pt » de cet aléa. Ce calcul est fondé sur l'hypothèse que la sismicité est un processus « poissonnien » : $TR = -DvLn(1 - Pt)$	161
Tableau 27 : Valeurs des principaux paramètres retenues pour la situation « de référence » et la situation « enveloppe » par l'Andra pour évaluer le scénario d'évolution normale [118]	164
Tableau 28 - Bilan massique sur un million d'années, maximum de débit molaire en différentes localisations du milieu géologique pour le SEN (situation « de référence » en haut et situation « enveloppe » en bas)	172
Tableau 29 - Facteurs de conversion ($Sv.an^{-1}$ par $Bq.L^{-1}$) appliqués par l'Andra pour les groupes de référence « multi-activités » aux exutoires du Barrois et du Dogger, pour les biosphères chaude et tempérée.	173
Tableau 30 - Doses maximales estimées par l'Andra aux exutoires du Barrois et du Dogger pour les biosphères chaude et tempérée.	174
Tableau 31 - Valeurs de perméabilités retenues pour chaque scénario et configuration de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture (situation « de référence » en haut et situation « enveloppe » en bas)	176

6 DEMARCHE DE SURETE

Le présent chapitre porte sur l'examen de la démarche de sûreté en exploitation puis après fermeture retenue par l'Andra au stade du **DOS**. Il convient de rappeler que le chapitre 2.8 présente les fonctions de sûreté et leur intégration dans la démarche retenue par l'Andra pour assurer la sûreté de **Cigéo**. Les principes de la démarche sont, selon l'Andra, conformes aux préconisations du guide de sûreté relatif au stockage en formation géologique profonde [3].

6.1 DEMARCHE DE SURETE POUR LA PHASE D'EXPLOITATION

6.1.1 OBJECTIFS DE PROTECTION CONTRE LES RAYONNEMENTS IONISANTS

Au cours de l'instruction, l'Andra a révisé les objectifs de protection retenus pour le personnel ainsi que pour la population (cf. Tableau 17).

	Travailleur classé en zone réglementée	Public / groupe de référence et environnement
Situations normale et dégradée	dose < 5 mSv/an ALARA ⁵²	Absence de rejets non concertés Rejets concertés suivant autorisations de rejets Dose < 0,25 mSv/an
Situations incidentelles (dimensionnement)	dose < 10 mSv par incident ALARA	Dose inférieure à la valeur de la réglementation (< 1 mSv par incident)
Situations accidentelles (dimensionnement)	dose < 20 mSv par accident ALARA	Dose < 10 mSv (intégrée sur 50 ans) Absence de nécessité de mesures de protection du public
Situations accidentelles (dimensionnement du Plan d'Urgence Interne (PUI))	ALARA	Mesures de protection du public limitées dans le temps et l'espace

Tableau 17 - Objectifs de protection contre les rayonnements ionisants (Andra, transmis au cours de l'instruction)

S'agissant des objectifs de protection radiologique retenus pour les travailleurs en situations normale et dégradée de fonctionnement (travailleurs classés comme exposés aux rayonnements ionisants en zone réglementée), l'Andra a précisé au cours de l'instruction que l'objectif de protection de 5 mSv/an était « *une première définition de la limite de dose individuelle annuelle à ne pas dépasser* », valeur qu'elle retient pour la conception de chaque nouvelle installation. A cet égard, l'IRSN note que l'Andra utilise l'objectif de dose individuelle pour guider ses activités d'optimisation de la conception de l'installation ; cette valeur s'apparente donc ainsi à la notion de « *contrainte de dose* » au sens de la directive 2013/59/Euratom du Conseil du 5 décembre 2013, **ce qui apparaît conforme aux pratiques usuelles au stade d'un DOS**. L'IRSN estime que la valeur unique de protection individuelle de 5 mSv/an retenue ne peut en revanche être considérée comme une valeur d'objectif car elle n'est pas adaptée aux postes de travail pour lesquels le niveau d'exposition externe est très faible (par exemple dans la salle de commande). L'IRSN rappelle ainsi, comme à l'issue de l'examen du « Dossier 2009 » [16] et du dossier « Maîtrise des risques en exploitation » [21], que la démarche d'optimisation et sa mise en œuvre lors de la configuration des

⁵² As Low As Reasonably Achievable : dispositions mises en place afin de réduire les expositions aussi basses que raisonnablement possible, compte tenu des facteurs économiques et sociaux

différents postes de travail ainsi que ses résultats en termes d'impact dosimétrique prévisionnel sont des attendus du dossier accompagnant la **DAC**.

D'une manière générale, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que les évaluations prévisionnelles de doses individuelles et collectives seraient présentées à l'échéance de la **DAC**. En particulier, elle ne retient aucune valeur d'objectif de dose collective à ce stade et a précisé que les postes de travail les plus dosants et les mesures prises dans le cadre de la démarche ALARA seraient précisés à cette échéance. L'IRSN souligne que la définition d'un objectif de dose collective est également un attendu dans le cadre du dépôt de la **DAC**. Il en va de même pour la sélection des dispositions et équipements de protection des travailleurs qui seront *in fine* retenus.

S'agissant des objectifs de protection retenus pour les travailleurs en situation incidentelle et accidentelle, l'IRSN constate que l'Andra retient, pour la suite des études de conception, un objectif de 10 mSv/incident par travailleur en situation incidentelle de dimensionnement, en lieu et place de 20 mSv/an dans les précédents dossiers, tout en rappelant son intention d'appliquer la démarche ALARA. A cet égard, l'IRSN estime que la révision à la baisse, par rapport au stade de l'esquisse, de l'objectif de dose en situation incidentelle pour les travailleurs constitue en soi un progrès. Au cours de la réunion préparatoire à la réunion des groupes permanents, l'Andra a précisé que la démarche itérative qu'elle mène consiste à réduire le plus possible les conséquences radiologiques estimées pour les travailleurs en situation incidentelle et accidentelles de manière à ce qu'elles soient en tout état de cause inférieures aux valeurs d'objectif de protection retenus à ce stade. **Sans présager de l'acceptabilité des valeurs prévisionnelles issues de ces études sur les conséquences radiologiques des scénarios incidentels et accidentels, l'IRSN estime cette démarche satisfaisante au stade d'un DOS.**

S'agissant des objectifs de dose pour le public en situations incidentelles et accidentelles, l'IRSN observe que les estimations des conséquences radiologiques, pour le public, des situations incidentelles et accidentelles enveloppes que l'Andra retient pour le dimensionnement de l'installation aboutissent toutes à des valeurs inférieures à très inférieures à 1 mSv. L'IRSN constate d'une part que les objectifs de protection retenus par l'Andra pour la population (1 mSv pour les situations incidentelles et 10 mSv pour les situations accidentelles) ne sont pas, à ce stade, incohérents avec les valeurs issues des estimations de l'Andra, d'autre part que les valeurs de ces objectifs sont supérieures à celles retenues usuellement pour les **INB** correspondant aux laboratoires et usines du cycle. Cependant, l'Andra a confirmé au cours de la réunion préparatoire que la mise en œuvre de sa démarche n'a pas encore abouti à des résultats consolidés. A ce titre, il appartiendra à l'Andra de présenter à l'échéance de la **DAC** l'ensemble des résultats détaillés de l'évaluation pour les situations incidentelles et accidentelles.

6.1.2 PRINCIPES DE LA DEMARCHE DE SURETE

Comme indiqué au chapitre 2.8 du présent rapport, l'Andra indique [39] reprendre les principaux objectifs fournis par le Guide de l'ASN relatif au stockage géologique [3]. Elle fonde la conception de **Cigéo** sur une approche coordonnée entre sûreté en exploitation et sûreté après fermeture.

Ainsi, la démarche de sûreté que retient l'Andra distingue d'une part la définition des exigences de sûreté à prendre en compte dans la conception [39][40], notamment à partir de l'identification des fonctions de sûreté (cf. chapitre 2.8) et de la définition des objectifs de protection (cf. chapitre 6.1.1), d'autre part l'étape d'évaluation qui vise à montrer que les choix de conception satisfont ces exigences. L'Andra précise que ce processus est itératif. L'Andra a de plus indiqué au cours de l'instruction que même si les paramètres à surveiller pour la sûreté après fermeture ne sont pas systématiquement liés à sa démonstration de la sûreté en exploitation, la surveillance en exploitation

intégrera ces paramètres. L'Andra a également précisé que les spécifications d'acceptation des colis intégreront les exigences spécifiées pour la sûreté en exploitation et après fermeture.

Par ailleurs, l'Andra indique [39] appliquer le principe de défense en profondeur en particulier pour la démarche de conception de Cigéo, en se basant notamment sur la redondance, la diversification et la séparation physique ou géographique des éléments importants pour la protection en adéquation avec un haut niveau de fiabilité. Dans l'application de ce principe de défense en profondeur, l'Andra précise « *prendre en compte l'éventualité de défaillances techniques, organisationnelles et humaines ainsi que la mise en place de lignes de défense graduées à l'égard des dangers internes et externes à l'installation pour y faire face et en limiter les conséquences* ».

L'IRSN considère que les principes retenus dans la démarche de sûreté de l'Andra sont satisfaisants, et observe qu'ils sont cohérents avec (i) le Guide de l'ASN relatif au stockage géologique [3], (ii) les travaux d'instances internationales sur les standards applicables aux stockages géologiques, tels que les exigences recensées dans le guide de sûreté de l'AIEA SSG-14 [207] et (iii) les principes développés à l'issue du projet GEOSAF II [206], relatif à l'intégration, dans le « safety case⁵³ » des stockages géologiques, de la sûreté en exploitation et de la sûreté après-fermeture. Ainsi, l'IRSN estime que la demande 2014 D25 [1] relative à la cohérence des objectifs de sûreté retenus en exploitation avec le guide de sûreté de l'ASN et les travaux des instances internationales sur le stockage géologique peut être considérée comme soldée.

6.1.3 SITUATIONS DE DIMENSIONNEMENT, DE DIMENSIONNEMENT DU PUI ET EXCLUES

L'Andra indique [39] avoir identifié, conformément à l'arrêté INB du 7 février 2012 [4], des catégories de situations qui relèvent du domaine (i) de fonctionnement normal et dégradé, (ii) incidentel et accidentel de dimensionnement, (iii) d'« extension du dimensionnement » ou de « dimensionnement du plan d'urgence interne (PUI) » et enfin (iv) de situations exclues. Par ailleurs, l'Andra retient, dans sa démarche, la sélection de situations de cumul d'événements ; son analyse de chacune de ces situations lui permet de les reverser dans une des catégories (ii) à (iv). Cette démarche est examinée ci-dessous.

6.1.3.1 Définition des différentes situations de fonctionnement

S'agissant du fonctionnement normal et dégradé, l'Andra précise qu'il regroupe « *l'ensemble des états et des opérations courants de l'installation, y compris les situations de maintenance ou d'arrêt programmées* », ainsi que les situations « *dont l'acceptabilité est démontrée pour une durée limitée vis-à-vis des intérêts⁵⁴* ». Elle ajoute que ce domaine de fonctionnement ainsi que les conditions et les actions prévues pour le maintien et le retour, en cas de dégradation, au fonctionnement normal des installations, seront présentés dans les règles générales d'exploitation (RGE), non définies à ce stade. A cet égard, l'Andra précise [39] certains paramètres clés relatifs au domaine de fonctionnement des installations qu'elle prévoit d'inclure dans son programme de surveillance, par exemple le débit de dose aux postes de travail, la contamination surfacique des colis, les paramètres liés au risque de criticité, la teneur en hydrogène... L'ensemble des paramètres surveillés pendant la phase d'exploitation, qu'ils

⁵³ Ensemble d'arguments et d'éléments d'information relatifs à la sûreté d'une installation ou d'une activité (Glossaire de sûreté de l'AIEA, édition 2007).

⁵⁴ Les « intérêts », définis dans l'article L. 593-1 du code de l'environnement, font référence à la sécurité, la santé, la salubrité publique, la protection de la nature et de l'environnement.

soient en support de la sûreté en exploitation ou après fermeture, permettra ainsi de décrire le domaine de fonctionnement normal de **Cigéo**. L'Andra intègre également dans ce domaine de fonctionnement normal des paramètres liés aux situations potentiellement rencontrées lors des opérations de fermeture du stockage, tels que par exemple un dégagement de gaz radioactifs des alvéoles **MAVL**.

Par exemple, l'Andra [39] présente certains paramètres qu'elle considère à surveiller en phase de construction pour la sûreté après-fermeture, notamment l'extension, la structure ou encore la perméabilité de la zone endommagée. Elle précise que des moyens de reconnaissance à l'avancement du creusement (cf. chapitre 4.5.1) seront utilisés en support à cette surveillance. En outre, certains paramètres complémentaires seront surveillés pendant l'exploitation en support exclusif à la démonstration de sûreté pour l'après fermeture, *via* par exemple des ouvrages dits « témoins », notamment des tronçons d'ouvrages de différentes natures « *choisis pour leur caractère représentatif ou pour leur positionnement particulier en regard des objectifs de sûreté en exploitation ou en après-fermeture* ».

L'IRSN estime que la définition donnée par l'Andra du domaine de fonctionnement normal de **Cigéo** est conforme à l'état de l'art ; il devra inclure à terme les limites opérationnelles associées aux divers composants de l'installation (par exemple les limites associées aux dépressions dans les locaux ou celles associées à leur taux de renouvellement d'air). Ce domaine constituera in fine un ensemble de situations correspondant au fonctionnement normal ainsi que de paramètres qui permettent de le borner.

S'agissant de ces paramètres clés retenus pour les différentes phases de **Cigéo**, l'IRSN estime que les premiers paramètres fournis par l'Andra sont effectivement déterminants pour la sûreté et n'appellent pas de commentaire particulier à ce stade du dossier. L'IRSN souligne toutefois que l'exhaustivité des paramètres clés à surveiller pour les opérations de fermeture, qui relèvent de la sûreté en exploitation, nécessite d'être spécifiquement vérifiée au regard du rôle déterminant des ouvrages de fermeture vis-à-vis de la sûreté après fermeture. L'Andra a sur ce point indiqué prévoir d'une part de présenter, à l'échéance de la **DAC**, les performances requises des ouvrages de fermeture, d'autre part de réaliser des démonstrateurs d'ouvrages de fermeture durant la phase pilote. A cet égard, l'IRSN rappelle [36] que la phase pilote de **Cigéo** a vocation à permettre de réaliser des essais de qualification des composants ou des procédés, tandis que, pour ce qui concerne les domaines à forts enjeux de sûreté identifiés au cours des instructions successives relatives au projet **Cigéo**, les éléments de démonstration de la performance des composants et des ouvrages auront été apportés à l'échéance de la **DAC**.

En conclusion, l'IRSN observe que l'Andra poursuit l'identification des limites et des conditions d'exploitation qui permettent de définir le domaine de fonctionnement normal et considère que les éléments fournis à ce stade sont suffisants pour solder la demande de l'ASN 2014 D27 [1] relative à la « première définition des domaines de fonctionnement envisagés ».

Pour ce qui concerne les situations incidentelles et accidentelles de dimensionnement, l'Andra indique qu'elles correspondent à toutes les situations de fonctionnement de l'installation non prévues en fonctionnement normal et dégradé et susceptibles d'altérer la protection des « intérêts ». En premier lieu, elle définit les situations incidentelles comme des situations dont la fréquence d'occurrence est modérée, dont les conséquences sur les personnes et l'environnement sont faibles et pour lesquelles une analyse est menée en vue de dimensionner l'installation afin de prévenir leur occurrence et de permettre le cas échéant un retour de l'installation en fonctionnement normal. En second lieu, l'Andra définit les situations accidentelles comme des situations dont « *la fréquence d'occurrence et les conséquences associées peuvent être jugées inacceptables* » s'il n'est pas mis en œuvre de dispositions spécifiques pour en limiter les conséquences sur les personnes et l'environnement. Au cours

de l'instruction, l'Andra a précisé [97] que les situations de dimensionnement sont les situations pour lesquelles la conception doit en prévenir l'occurrence, permettre un retour au fonctionnement normal et minimiser leur impact. **Ceci n'appelle pas de commentaire particulier de la part de l'IRSN.**

Les situations de dimensionnement du PUI sont constituées par l'Andra [97] sur la base (i) de situations initiées par des aléas externes (séisme et inondation) d'une intensité « *légèrement supérieure à celle retenue pour les situations du dimensionnement* », (ii) de situations « extrêmes » mettant en jeu la perte postulée de certaines utilités et/ou des aléas naturels d'une intensité nettement supérieure à celle du dimensionnement, de manière à considérer le séisme, l'inondation, « *les autres phénomènes naturels et les cumuls d'agressions* » dans le cadre des évaluations complémentaires de sûreté (ECS), ainsi que (iii) de « *situations accidentelles non retenues comme situation de dimensionnement compte tenu de leur faible vraisemblance (cumul de défaillances internes indépendantes)* ». Elle indique que l'étude de ces situations permet d'évaluer la robustesse de l'installation et de détecter d'éventuels effets falaise, c'est-à-dire des situations conduisant à une perte de confinement de substances radioactives ou dangereuses, une perte des moyens de maîtrise du risque d'explosion lié à l'hydrogène ou encore du risque d'échauffement et ainsi, le cas échéant, de déterminer des dispositions complémentaires de prévention ou d'atténuation des conséquences. Elle précise en outre que « *parmi l'ensemble de ces situations, sont identifiées les situations d'urgence nécessitant la mise en place d'une organisation et des dispositions matérielles qui dimensionnent le plan d'urgence interne* », dont elle indique prévoir de transmettre l'étude à l'échéance de la DAC.

L'IRSN rappelle, comme il l'indiquait lors de l'examen du dossier « **Maîtrise des risques en exploitation** », qu'une situation conduisant à une perte de maîtrise de l'installation est inacceptable. En outre, il soulignait l'importance de rechercher toutes les dispositions permettant d'éviter une situation menant à des conditions d'exploitation qui ne seraient pas similaires à celles prévalant avant son occurrence. Ainsi, l'IRSN estime qu'un objectif majeur de l'étude de ces situations est d'évaluer la robustesse de l'installation vis-à-vis de la perte de sa maîtrise, et donc de prévoir les moyens supplémentaires nécessaires pour gérer une situation résultant d'une aggravation d'une situation accidentelle et limiter les rejets vers l'environnement. L'Andra a indiqué au cours de l'instruction que soit l'identification de ces situations accidentelles permettra de dimensionner les dispositions et l'organisation à mettre en œuvre dans le cas du gréement du PUI, soit les situations d'« extension de dimensionnement » seront intégrées, à l'échéance de la DAC, dans le dimensionnement de l'installation. **L'IRSN estime que cette approche est satisfaisante.** L'examen des situations de dimensionnement du PUI retenues par l'Andra est présenté dans les différents chapitres consacrés à chacun des risques concernés, et les scénarios de cumul et ECS sont analysés dans le chapitre 6.1.4 ci-après.

S'agissant des situations exclues, l'Andra les définit comme des situations physiquement impossibles ou extrêmement improbables. Dans ce dernier cas, l'Andra considère qu'il s'agit de situations accidentelles pour lesquelles un certain nombre de dispositions de prévention robustes sont mises en place. A titre d'exemple, sont exclues les situations d'emballage du funiculaire et de collision en gare basse, d'incendie dans le puits de retour d'air vicié (cf. Annexe T15), de perte de la maîtrise des dégagements thermiques et encore d'incendie non maîtrisé dans l'alvéole MAVL conduisant à l'inflammation d'un colis de stockage et sa propagation aux colis adjacents. Les scénarios *in fine* exclus par l'Andra sont discutés dans les différents chapitres consacrés à chacun des risques concernés. Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué que les dispositions valorisées en support à l'exclusion d'une situation accidentelles seront classées éléments importants pour la protection (EIP) ou activités importantes pour la

protection (AIP), ce qui est satisfaisant sur le principe. De façon plus générale, l'IRSN considère que chacune des lignes de défense valorisées dans un scénario doit être classée EIP ou AIP (cf. chapitre 6.1.5).

6.1.3.2 Méthodologie d'identification et de classement des différentes situations

Dans le document [97] et au cours de l'instruction, l'Andra a détaillé sa méthodologie d'identification et de classement des situations dans les catégories précitées (incidentelles et accidentelles de dimensionnement, de dimensionnement du PUI et exclues). L'Andra identifie des événements, qu'elle appelle événements non souhaités, à partir de l'analyse des risques. Elle vérifie ensuite le respect des objectifs de protection pour chaque scénario enveloppe considéré et identifie des marges. Enfin, l'Andra vérifie que les dispositions techniques, humaines et organisationnelles qui garantissent ces états de l'installation sont correctement dimensionnées. Ces dispositions constituent des lignes de défense, auxquelles l'Andra attribue ensuite le qualificatif « forte » ou « modérée », selon des critères récapitulés dans le Tableau 18.

Ligne de défense	Type de ligne de défense	
	Ligne de défense forte (F)	Ligne de défense modérée (M)
Technique	Système actif ou passif qui fait l'objet d'exigences définies en termes de code de construction et de fabrication	Système passif qui n'est pas soumis à des exigences de construction nucléaire
	Systèmes actifs qui sont redondés pour répondre à un critère de défaillance unique	Systèmes actifs qui ne sont pas redondés
Organisationnelle	Les moyens organisationnels et humains ne peuvent pas être considérés comme des barrières fortes à ce stade	Consignes faisant appel à un entraînement périodique
		Procédures, consignes qui font appel à un contrôle organisé
		Expérience et bonne pratique de l'opérateur
		Actions définies et étant considérées comme un réflexe : telles que l'arrêt d'urgence.

Tableau 18 : Définition de la robustesse des dispositions pour chaque type de ligne de défense [97]

L'IRSN note que l'Andra propose un classement de la robustesse des lignes de défense selon leur typologie. Or, pour l'étude des scénarios incidentels et accidentels, l'IRSN considère que chaque ligne de défense sollicitée doit être impérativement rendue disponible, ce que le classement précité (« fortes » ou « modérées ») ne laisse pas supposer a priori.

De plus, selon le nombre et la robustesse (« fortes » ou « modérées ») des lignes de défense considérées, mais également « sur la base d'avis d'experts ou d'éléments du retour d'expérience », l'Andra attribue un certain degré de vraisemblance à l'événement en question, de telle sorte que plus le nombre de lignes de défense à effacer est grand et plus leur robustesse est importante, moins la situation résultante est vraisemblable. Ce degré de vraisemblance est directement lié au classement de la situation qui résulte de l'événement, comme le montre la Figure 72 ci-dessous.

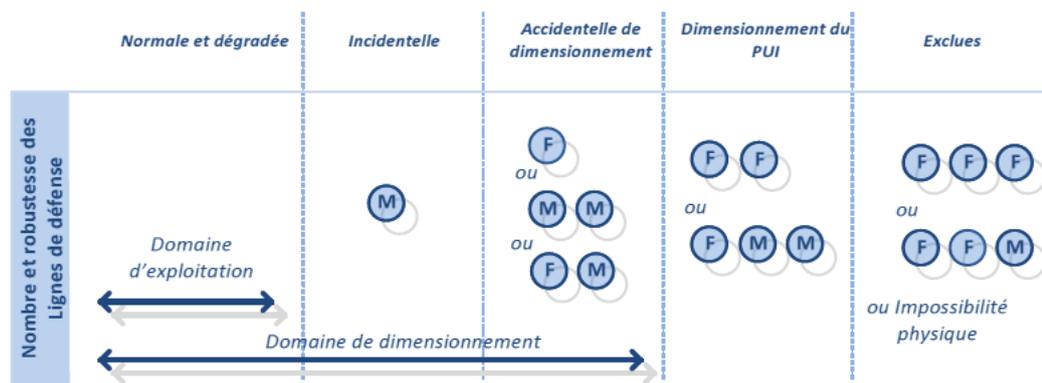


Figure 72 : Méthodologie d'identification et de classement des situations de dimensionnement et des situations hors dimensionnement [97]

Des cinq types de situations identifiées (cf. colonnes de la Figure 72), l'Andra présente trois familles de scénarios [97] ; les situations exclues, les situations de dimensionnement et les situations de dimensionnement du PUI (cf. chapitre 6.1.3.1).

L'IRSN convient que la classification des scénarios précitée constitue une base pour la définition des dispositions de conception en cohérence avec le principe de défense en profondeur et ainsi avec les prescriptions de l'arrêté INB [4]. L'IRSN estime ainsi que l'engagement 2014 E5 [1] relatif à la présentation dans le DOS d'une classification des scénarios peut être considéré comme soldé, tout comme la demande 2014 D31 [1] relative à la présentation des situations retenues pour le dimensionnement de l'installation.

En revanche, l'IRSN constate que l'Andra classe en pratique les scénarios, selon les trois familles précitées, en considérant le nombre de lignes de défense qu'il est nécessaire d'effacer pour que le scénario survienne. L'IRSN rappelle qu'un tel classement doit se faire sur la base de l'évaluation des conséquences des scénarios et non *stricto sensu* selon le nombre de lignes de défense mises en jeu. Aussi, bien que la définition des familles de scénarios retenue par l'Andra soit satisfaisante, l'IRSN considère que la démarche de classement des scénarios dans chacune des familles ne serait utile que dans la mesure où elle se fonderait sur l'évaluation des conséquences de ces scénarios et non sur l'interposition d'un nombre donné de lignes de défense.

En conclusion, l'IRSN considère que l'Andra devrait s'attacher à étudier les scénarios et leurs conséquences et, sur cette base, définir des lignes de défense dont la robustesse est en adéquation avec lesdits scénarios. En tout état de cause, l'IRSN considère que la robustesse d'une ligne de défense doit être définie selon son rôle dans chacun des scénarios et non selon sa nature. Aussi, l'IRSN convient qu'une démarche interne à l'Andra, permettant de définir des priorités sur les lignes de défense à envisager selon les scénarios retenus pendant ses études d'avant-projet, peut le cas échéant permettre d'établir une classification, mais ne suffit pas à elle seule à justifier la pertinence des scénarios retenus dans la démonstration de sûreté qui sera présentée par l'Andra à l'échéance de la DAC. A cet égard, l'Andra a indiqué au cours de la réunion préparatoire à la réunion des groupes permanents que sa démarche se verrait complétée en ce sens d'ici à l'échéance de la DAC par ces évaluations de conséquences, ce qui est satisfaisant.

Par ailleurs, pour ce qui concerne les cumuls d'événements, l'Andra indique [97] considérer pour le développement des scénarios de sûreté, en sus d'un événement initiateur unique, des situations de cumuls d'événements

indépendants. Plusieurs types de combinaisons différentes sont identifiés, tel le cumul d'un événement de dimensionnement avec une agression d'origine interne ou externe, ou avec la défaillance d'une disposition de mitigation des conséquences. L'Andra indique procéder ensuite à un « *examen de la plausibilité de chaque situation de cumul* », sur la base duquel des combinaisons d'événements peuvent être exclues de l'analyse si elles sont de « *faible vraisemblance ou probabilité* ». **L'IRSN estime que la prise en compte d'une démarche de cumul par l'Andra est satisfaisante sur le principe et que la demande 2014 D30 [1] peut être considérée comme soldée.** Néanmoins, l'IRSN observe que la défaillance d'une disposition de mitigation des conséquences est prise en compte par l'Andra comme un cumul alors qu'en toute rigueur, elle devrait être considérée à la conception comme une règle d'étude qui fonde le développement des scénarios. Par ailleurs, l'Andra indique classer certains scénarios découlant des cumuls d'événements et d'agressions comme des situations de dimensionnement du PUI. Or, l'IRSN estime qu'un cumul identifié comme plausible doit systématiquement être pris en compte dans le dimensionnement de l'installation. **L'approche de l'Andra n'est donc pas pleinement satisfaisante** car écarter du dimensionnement des cumuls plausibles peut conduire à redéfinir le nombre et la robustesse des lignes de défense.

Aussi, l'IRSN estime que dans le dossier de DAC, l'Andra devra intégrer, dans le dimensionnement de l'installation et des dispositions de sûreté associées, les cumuls plausibles d'événements identifiés. Ce point fait l'objet de l'engagement E25-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

Enfin, à l'issue de l'application de sa méthodologie d'identification et de classement des situations (cf. Annexe T15), l'Andra d'une part retient les situations de dimensionnement de l'installation et les groupe en étudiant les conséquences radiologiques du scénario considéré comme enveloppe, d'autre part évalue les conséquences radiologiques des situations de dimensionnement du PUI. A cet égard, l'IRSN estime qu'écarter certains scénarios selon la démarche précitée, en considérant que les conséquences radiologiques sont couvertes par un autre scénario, peut conduire à négliger la nécessité de dispositions de sûreté, qui peuvent être différentes selon les scénarios, ou à masquer l'importance du scénario de cumul au regard d'autres critères, par exemple la préservation de l'installation (cf. *supra*). En outre, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction ne pas systématiquement mener l'évaluation des conséquences des scénarios du dimensionnement en considérant qu'ils puissent être couverts, en termes de conséquences radiologiques, par un autre scénario du dimensionnement. Or, comme pour les scénarios de cumul, l'IRSN estime que le fait de n'examiner que les situations « enveloppes » en termes de conséquences radiologiques peut conduire à négliger la nécessité de dispositions de sûreté qui pourraient être mises en évidence lors de l'examen des scénarios non enveloppes. Enfin, il conviendrait de prendre en compte les conséquences en termes de dispersion de toxiques chimiques. Au cours de la réunion préparatoire à la réunion des groupes permanents, l'Andra a indiqué qu'elle prévoyait de tenir compte d'un ensemble de critères plus variés que les seules conséquences radiologiques en support à l'étude approfondie des scénarios.

Aussi, l'IRSN considère que l'Andra devra présenter, dans le dossier de DAC, l'examen de l'ensemble des scénarios retenus, qu'ils soient enveloppes ou non en termes de conséquences radiologiques et chimiques, y compris pour chaque scénario de cumul plausible, et y associer les dispositions de sûreté qui en découlent le cas échéant. Ce point fait l'objet de l'engagement E26-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

Au cours de l'instruction, l'Andra a fourni le détail de certains de ces scénarios enveloppes (ceux liés aux risques incendie et manutention) et notamment de la qualification des lignes de défense impliquées et le classement de ces

scénarios qui en découle. Indépendamment des réserves exprimées ci-dessus quant à cette classification, l'examen approfondi de l'IRSN n'a porté que sur certains scénarios, jugés représentatifs des risques prépondérants encourus au regard des instructions précédentes et des évolutions de conception présentées par l'Andra. Cet examen est présenté dans les chapitres relatifs à ces différents risques.

6.1.4 SCENARIOS DE CUMUL ET ECS

S'agissant des scénarios de cumul d'événements, l'Andra retient [39] les situations suivantes :

- l'incendie et l'inondation d'origine externe,
- l'incendie et la perte de l'alimentation électrique,
- l'incendie et le séisme,
- la perte d'alimentation électrique et le séisme.

L'Andra indique en outre identifier comme cumul possible l'occurrence simultanée de conditions climatiques extrêmes et d'un séisme mais l'IRSN observe qu'elle ne retient pas *in fine* de telles situations. Parmi les situations retenues par l'Andra, l'IRSN relève que la perte d'alimentation électrique et le séisme sont des événements liés ; en effet, le retour d'expérience montre que le second est souvent une cause de la première. De la même façon, un incendie et un séisme peuvent être considérés comme des événements liés. Par ailleurs, l'arrêté INB [4] demande d'intégrer dans la démonstration de sûreté d'une installation les cumuls plausibles entre les agressions internes suivantes : les émissions de projectiles, les défaillances d'équipements sous pression, les collisions et chutes de charges, les explosions, les incendies, les émissions de substances dangereuses, les inondations trouvant leur origine dans le périmètre de l'installation nucléaire de base, les interférences électromagnétiques, les actes de malveillance et entre les agressions externes suivantes : les risques induits par les activités industrielles et les voies de communication, le séisme, la foudre et les interférences électromagnétiques, les conditions météorologiques ou climatiques extrêmes, les incendies, les inondations d'origine externe, les actes de malveillance. Au cours de l'instruction, l'Andra a mentionné que la démarche d'identification des cumuls a été mise à jour en vue de la DAC mais que la mise en œuvre de cette démarche reste à effectuer. **En tout état de cause, en lien avec la conclusion précédente relative aux scénarios retenus, l'IRSN estime que l'Andra devra compléter l'identification des cumuls plausibles à retenir dans sa démonstration de sûreté.**

S'agissant des scénarios retenus dans le cadre des ECS, l'Andra identifie à ce stade cinq situations redoutées potentielles susceptibles d'aboutir à un effet falaise conduisant à des rejets atmosphériques importants :

- la chute d'un colis primaire dans la cellule de déchargement des colis primaires et la perte du deuxième système de confinement, consécutives à un séisme majoré,
- la chute d'un colis de stockage MAVL dans la cellule de manutention et la perte du deuxième système de confinement, consécutives à un séisme majoré,
- un incendie au poste de contrôle de la cellule de déchargement des colis primaires et la perte du deuxième système de confinement, consécutifs à un séisme majoré,
- un incendie du pont stockeur dans l'alvéole de stockage MAVL et la perte du deuxième système de confinement, consécutifs à un séisme majoré,

- la perte de la ventilation des alvéoles de stockage MAVL susceptible de conduire à l'atteinte de la LIE de l'hydrogène dans l'alvéole, consécutive à un séisme majoré ou à une perte électrique de très longue durée.

A partir de ces situations, l'Andra présente les dispositions permettant de limiter les rejets de substances radioactives dans l'environnement et identifie d'une part que certains équipements ou structures devront être dimensionnés à un séisme d'intensité supérieure au SMS, d'autre part que des moyens humains d'intervention seront nécessaires à la gestion de ces situations d'urgence. L'Andra a précisé au cours de l'instruction que les locaux de gestion des situations d'urgence en surface seraient dimensionnés au séisme de niveau ECS. S'agissant en particulier de la situation d'incendie du pont stockeur dans l'alvéole de stockage MAVL et la perte du deuxième système de confinement, l'Andra retient comme « *équipements essentiels* » le confinement statique assuré notamment par la façade d'accostage, les portes et les clapets coupe-feu. En outre, s'agissant de la situation de perte de la ventilation des alvéoles de stockage MAVL ou de l'alimentation électrique, d'une durée susceptible de conduire à l'atteinte de la LIE, l'Andra indique que des dispositions palliatives pourront être mises en œuvre, tels que des moyens d'alimentation électrique mobiles et des moyens de secours dans un délai inférieur au délai d'atteinte potentielle de la LIE au sein d'un alvéole de stockage MAVL. Elle précise que ces dispositions seront présentées à l'échéance de la DAC.

L'IRSN constate que l'Andra a bien engagé une démarche de définition de situations extrêmes de type « ECS » dans la conception de Cigéo et à ce titre, l'IRSN estime que l'engagement 2014 E6 et la demande 2014 D22 [1], relatifs à la prise en compte de la démarche des ECS au stade du DOS peuvent être considérés comme soldés. Néanmoins, l'IRSN ne peut pas à ce stade se prononcer quant à la suffisance des situations identifiées et note en particulier qu'une situation redoutée d'emballement de réactions exothermiques dans les enrobés bitumineux n'a pas été prise en compte par l'Andra dans sa démarche. L'IRSN est en désaccord sur ce point, examiné au chapitre 7.2.1.7.

Pour ce qui concerne les aléas retenus dans ces ECS, l'Andra a précisé au cours de l'instruction que l'aléa sismique majoré retenu pour l'ensemble des situations examinées correspond à 1,5 fois le SMS. L'IRSN rappelle que l'ASN a demandé aux exploitants de retenir un spectre qui doit « être enveloppe du séisme majoré de sécurité du site, majoré de 50%, être enveloppe des spectres de site définis de manière probabiliste avec une période de retour de 20 000 ans, prendre en compte pour sa définition les effets de site particuliers et notamment la nature des sols, prendre en compte les failles potentiellement actives identifiées à proximité de l'installation » [168]. Il appartient donc à l'Andra de montrer que ce « spectre ECS » qu'elle retient à ce stade (1,5 fois le SMS), est enveloppe d'un spectre d'aléa probabiliste à 20 000 ans de période de retour. A cet égard, les spectres SMS évalués au stade du DOS et envisagés pour la DAC par l'Andra font l'objet d'observations et recommandations de la part de l'IRSN au chapitre 7.2.3.1 du présent rapport. Aussi, les éléments relatifs aux niveaux sismiques à prendre en compte dans le cadre des ECS devront être complétés dans le dossier de DAC. S'agissant des autres aléas naturels, l'IRSN relève que l'Andra ne présente des niveaux d'aléa d'inondation et météorologiques que pour le dimensionnement alors qu'une pratique mise en œuvre pour les INB depuis l'accident de Fukushima consiste à définir, en complément de leurs référentiels, des niveaux d'aléa pour les ECS. Une attention particulière sera donc portée par l'IRSN pendant l'instruction du dossier de DAC sur ces éléments attendus, afin d'évaluer les niveaux retenus pour chacun des aléas considérés.

Enfin, l'Andra n'aborde pas, dans l'ECS, l'accident de criticité. Elle a précisé au cours de l'instruction ne pas identifier de scénario susceptible de remettre en cause la maîtrise du risque de criticité compte tenu des marges disponibles. L'IRSN estime pour sa part que le risque de criticité ne peut pas être totalement exclu en cas de situation extrême conduisant à la modification de la géométrie des colis de déchets mais qu'il ne saurait être à l'origine d'un effet falaise compte tenu de son impact limité à la proximité immédiate du siège de l'accident. Toutefois, dans le cas où des situations extrêmes nécessiteraient une intervention humaine qui pourrait être entravée par les conséquences d'une excursion critique, l'IRSN estime que l'Andra devrait considérer l'accident de criticité comme un aggravant pour ces ECS au titre de la gestion de crise.

S'agissant des cinq situations redoutées retenues par l'Andra, l'IRSN note que certaines d'entre elles peuvent aboutir à une perte de la ventilation et un risque d'atteinte de la LIE pour lesquels des moyens mobiles de secours sont envisagés afin de rétablir la ventilation. Un tel scénario peut également se produire à la suite d'une erreur humaine et l'examen de ses effets peut fournir des informations utiles quant à la robustesse du système, comme le soulignait [8] la revue du groupe d'experts réunis par l'AIEA effectuée à l'automne 2016. L'IRSN considère de surcroît que cet enjeu se présente pour tous les alvéoles MAVL remplis de colis, ce qui pourrait conduire l'Andra à prévoir une flotte imposante de moyens mobiles de secours. En outre, l'IRSN souligne que l'Andra identifie le séisme majoré comme événement initiateur de presque toutes les situations redoutées mais n'examine pas la combinaison de ces situations, causées par le seul même séisme majoré. En effet, si ces situations survenaient de manière concomitante, la contamination des galeries adjacentes à l'alvéole MAVL dont la ventilation serait arrêtée, par exemple, serait à prendre en compte pour prévoir l'intervention des moyens de secours dédiés à la ventilation dans les autres alvéoles MAVL, ce qui devrait donc être une donnée d'entrée pour le dimensionnement des moyens de secours que l'Andra retient. Par ailleurs, l'IRSN relève que l'Andra ne prévoit pas de système de coupure des alimentations électriques en cas de séisme. Or, le retour d'expérience montre que des incendies d'origine électriques peuvent se produire consécutivement à un séisme. Enfin, l'IRSN note qu'au stade du DOS, l'Andra ne présente pas d'évaluation des conséquences radiologiques (et/ou chimiques) des situations redoutées identifiées. Or, l'IRSN estime que cette évaluation reste nécessaire pour juger de l'efficacité et du bien-fondé des éventuelles dispositions prévues à la conception pour limiter les effets des situations de type ECS.

Aussi, l'IRSN considère que les évaluations complémentaires de sûreté devront être complétées dans le dossier de DAC, notamment en :

- précisant les effets falaise potentiels pour des phénomènes naturels extrêmes, et le cas échéant, justifiant le niveau d'aléa « ECS » retenu pour le dimensionnement des composants entrant dans la définition du « noyau dur » ;
- tenant compte des combinaisons de situations causées par le même événement initiateur ;
- identifiant les moyens de secours nécessaires et les équipements en interface avec eux, ainsi que les contraintes liées à l'intervention en situation de type « ECS » nécessitant un dimensionnement adéquat ;
- évaluant, sur la base des conséquences radiologiques calculées pour chacune des situations redoutées, le bien-fondé et l'efficacité des dispositions prévues.

Ce point fait l'objet de l'engagement E27-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

6.1.5 EIP ET AIP

6.1.5.1 Les EIP

L'Andra présente une première liste [39] d'éléments importants pour la protection (EIP) qu'elle retient. L'Andra précise que les EIP sont les dispositions qui « *participent directement à la réalisation et au maintien d'une fonction de protection ou à son contrôle* », en associant les éléments supports à ces derniers si leur défaillance conduit à perdre une fonction de protection, ainsi que ceux qui ne participent pas directement au maintien d'une fonction de protection mais dont la défaillance conduit à la perte de l'une d'entre elles. L'Andra indique alors que leur sélection se fait sur la base de l'étude des conséquences directes engendrées par la défaillance de l'élément examiné. Enfin, l'Andra retient comme EIP les éléments qui assurent la protection d'un EIP ou dont la défaillance est susceptible d'agresser ou d'endommager un EIP. Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué [97] regrouper les EIP dans les catégories suivantes :

- les EIP liés aux risques radiologiques identifiés notamment sur la base de l'analyse de sûreté de l'INB ;
- les EIP liés aux risques non radiologiques identifiés sur la base de l'analyse de sûreté de l'INB et des études de danger de l'installation ;
- les EIP liés aux inconvénients identifiés sur la base de l'analyse de sûreté, de l'étude d'impact, des décisions et arrêtés de rejets associés.

L'Andra précise [39] que les « risques » concernent le fonctionnement accidentel de l'installation, qu'ils soient de nature radiologique ou non, et que les « inconvénients » sont associés au fonctionnement normal ou dégradé.

Pour ce qui concerne les EIP liés aux risques, l'IRSN relève que les définitions précitées des EIP liés aux accidents radiologiques ou non radiologiques ne prennent pas en considération de manière explicite la maîtrise des situations incidentelles et des situations exclues. Toutefois, l'Andra indique [97] que les EIP liés aux risques radiologiques et ceux liés aux risques non radiologiques sont identifiés à partir de l'étude des scénarios incidentels et accidentels, et des dispositions techniques et/ou organisationnelles visant à maîtriser les risques identifiés. L'IRSN considère que les précisions apportées par l'Andra complètent la définition générale d'identification des EIP concernant la prévention, la surveillance et la limitation des conséquences des situations incidentelles et accidentelles ou des éléments dont la défaillance pourrait initier une situation accidentelle, incluant ceux ayant un rôle pour le maintien de l'intégrité d'autres EIP, **ce qui est satisfaisant sur le principe**. Ainsi, l'IRSN estime que les éléments identifiés par l'Andra comme EIP incluent les lignes de défense associées aux dispositions techniques valorisées dans le classement des scénarios de sûreté (cf. ci-dessus). En tout état de cause, l'IRSN considère que l'Andra devra appliquer cette démarche à l'aide de l'ensemble du référentiel de sûreté lorsque celui-ci sera constitué.

Pour ce qui concerne les EIP liés aux inconvénients, l'Andra indique que leur identification est réalisée à partir des dispositions retenues :

- pour respecter les exigences et les limites réglementaires, retenues dans l'étude d'impact ainsi que dans les textes réglementaires associés aux autorisations de rejets et de prélèvements d'eau et aux nuisances ;
- pour détecter tout dépassement des limites réglementaires ;
- pour arrêter une situation anormale.

Ceci n'appelle pas de commentaire de la part de l'IRSN.

6.1.5.2 Les AIP

L'Andra a indiqué au cours de l'instruction [97] identifier trois types d'activités importantes pour la protection (AIP) :

- les AIP liées aux EIP, qui rassemblent les dispositions d'étude, de conception, de construction, d'essais, de suivi en service, d'exploitation, de contrôle et d'essai périodiques et de maintenance, associées à la qualification de l'ensemble des EIP ;
- les AIP non liées à des EIP, participant à la démonstration de la protection des intérêts (cf. note de bas de page 54), telles que les activités de surveillance de l'environnement, de traitement des écarts et de gestion de modifications de l'installation ;
- les AIP permettant de préserver les exigences définies des composants importants identifiés dans la démonstration de sûreté après fermeture.

L'Andra ne fournit pas à ce stade de liste d'AIP.

Les trois catégories d'AIP retenues par l'Andra n'appellent pas de commentaire particulier de la part de l'IRSN. L'IRSN relève que les intitulés des AIP retenus par l'Andra à ce stade incluent les activités de contrôle, de formation ou de gestion des compétences associées aux dispositions organisationnelles que l'Andra valorise comme lignes de défense dans le classement des scénarios de sûreté examiné ci-avant. Par ailleurs, l'IRSN souligne la cohérence des intitulés des différentes catégories d'AIP retenus, qui ne se limitent pas à la sûreté de Cigéo en phase d'exploitation mais incluent également les composants clés participants à la mise en œuvre des fonctions de sûreté après fermeture. **Ceci est satisfaisant.**

Néanmoins, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction [97] que des activités de contrôle et de surveillance dès la phase de construction, puis pendant la phase d'exploitation de l'installation, pour garantir la sûreté après fermeture seront à retenir comme AIP, sans toutefois les définir à ce stade. L'IRSN relève que la surveillance de l'installation, au-delà de celle des paramètres liés aux EIP, peut s'avérer essentielle pour la sûreté de l'installation (cf. chapitre « surveillance ») ainsi que des activités telles que le suivi de l'inventaire des matières et des colis, la traçabilité du plan de stockage ou le respect des spécifications des colis de déchets. **A cet égard, il conviendra d'examiner le dossier en support à la DAC sous l'angle de la suffisance des AIP retenues par l'Andra.**

6.1.5.3 Qualification des EIP

Pour chaque EIP, l'Andra applique une démarche de qualification, basée sur :

- une qualification initiale de l'EIP : dispositions d'études, de construction et d'essai permettant de démontrer le respect des exigences définies ;
- une vérification de la pérennité de la qualification initiale : dispositions de suivi en service, de contrôle et de maintenance suite à la mise en fonctionnement de l'élément.

Ces activités de mise en œuvre de la démarche de qualification des EIP sont des AIP.

Dans le cas d'éléments ne pouvant pas faire l'objet de dispositions de maintenance et de contrôle (impossibilité d'accès par exemple), l'Andra indique que la qualification initiale de l'EIP apportera, avec un degré de confiance suffisant pendant la durée nécessaire définie dans la démonstration, la garantie du respect des exigences définies.

Ceci n'appelle pas de remarque sur le principe. Toutefois, l'IRSN relève que l'Andra ne présente à ce stade aucune disposition, telles que des marges identifiées à la conception, pour apporter le degré de confiance précité pendant la durée séculaire d'exploitation de l'installation de nature à causer un vieillissement important des différents composants, sur la base d'une analyse des sollicitations et des conditions auxquelles ces EIP seraient soumis. Aussi,

dans le cas d'EIP ne pouvant faire l'objet de maintenance et de contrôle, l'Andra devra présenter, dans le dossier de DAC, les dispositions retenues à la conception permettant de justifier du maintien de la qualification de ces EIP, au regard de leurs durées et de leurs conditions de service. Ce point fait l'objet de l'engagement E28-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

Le point relatif à la gestion du vieillissement de l'installation est détaillé au chapitre 7.2.9

6.1.5.4 Exigences définies

L'Andra présente, conjointement à la liste préliminaire d'EIP, des exigences définies associées. L'Andra indique [39] qu'elles doivent permettre aux EIP auxquels elles sont assignées d'assurer leur fonction vis-à-vis des différentes sollicitations et dans différentes conditions d'ambiance, dans les situations de fonctionnement de l'installation (normal, dégradé, incidentel et accidentel) et pendant leur durée de service. Elle précise que les EIP et les exigences définies identifiées sont susceptibles d'évoluer d'ici la DAC. L'IRSN relève toutefois que les exigences définies identifiées ne sont pas associées aux AIP définies par l'Andra (cf. AIP liées aux EIP présentées au chapitre 6.1.5.2 ci-dessus) ou présentent un caractère trop général pour permettre de qualifier l'EIP à la conception ou garantir sa qualification au cours de l'exploitation.

Aussi, l'IRSN souligne que l'identification des exigences définies assignées aux EIP, assorties des critères nécessaires à la qualification des EIP, en explicitant leur déclinaison en fonction des AIP retenues pour les différentes phases de vie de l'installation, depuis la conception jusqu'à la fermeture de l'installation, est un attendu du dossier de DAC.

6.1.6 SITUATIONS POST-ACCIDENTELLES

L'IRSN rappelle que lors de l'évaluation du dossier « Maîtrise des risques en exploitation », il avait appelé l'attention de l'Andra sur le lien entre sûreté en phase d'exploitation et à long terme. En particulier, l'analyse des scénarios d'accident retenus par l'Andra ne pouvait, selon l'IRSN, se limiter à l'étude de leurs conséquences sur la sûreté opérationnelle, mais également sur les composants jouant un rôle dans la mise en œuvre des fonctions de sûreté de l'installation après sa fermeture. A cet égard, l'IRSN regrette qu'au stade du DOS, aucun scénario accidentel de dimensionnement de l'installation ou du PUJ ne retienne la dégradation de fonctions de sûreté à long terme, en particulier à l'issue d'accidents touchant les propriétés de la roche hôte. A cet égard, l'Andra a indiqué qu'elle vérifierait à l'échéance de la DAC que ce type de scénario est couvert par un scénario d'évolution du stockage à long terme prenant en compte des propriétés dégradées du Callovo-Oxfordien, **ce qui est satisfaisant**. De plus, l'IRSN note que l'Andra retient certaines hypothèses issues de situations accidentelles (chute de colis, vieillissement, écart) et vérifie que les dysfonctionnements sont *a minima* couverts par un scénario d'évolution du stockage à long terme. A titre d'exemple, « toute défaillance de colis de déchets MA-VL est couverte par les choix de sûreté en matière de modèles de relâchement y compris pour le scénario d'évolution normale (pas de fonction attribuée aux colis MA-VL). En ce qui concerne le colis de déchets HA, les SEA/WHAT-IF couvrent des cas de dysfonctionnement de colis (y compris pour un ensemble d'alvéole) ». L'IRSN estime ainsi que l'Andra a bien pris la mesure du lien évoqué

ci-avant. Sa prise en compte dans la définition du domaine de fonctionnement de l'installation ainsi que la surveillance associée à sa maîtrise seront l'objet d'une vigilance particulière de la part de l'IRSN à l'échéance de la [DAC](#).

En revanche, l'IRSN estime que la prise en compte des situations post-accidentelles n'est pas à la mesure des enjeux associés à une reprise d'exploitation de [Cigéo](#) à la suite d'un accident. En effet, l'Andra retient une stratégie de reprise du fonctionnement de l'installation à la suite d'une situation accidentelle de dimensionnement du [PUI](#), considérant que l'installation est maintenue dans un état sûr à l'issue de la situation envisagée grâce aux dispositions retenues pour sa maîtrise, et en vertu de l'analyse de l'état de l'installation qui serait alors faite *ad hoc* afin de décider des conditions associées à la reprise de l'exploitation et de la possibilité de retirer ou non le colis, selon les trois possibilités suivantes :

- « le colis primaire ou de stockage peut être repris avec les moyens disponibles dans [Cigéo](#) ;
- le colis primaire ou de stockage nécessite des dispositions spécifiques permettant sa récupération après par exemple la fixation de la contamination, le changement ou l'adaptation de l'équipement de manutention, la mise à disposition d'un équipement de manutention ou d'une hotte de transfert spécifique à la situation post-accidentelle ;
- le colis de stockage et/ou son environnement ne permettent pas d'envisager sa récupération dans des conditions de sûreté suffisantes ; la possibilité de le laisser en l'état dans l'alvéole de stockage est à analyser au regard des exigences de sûreté en exploitation et après fermeture et des conditions de récupérabilité » [39].

Or, l'IRSN rappelle que le retour d'expérience d'accidents dans des installations souterraines et/ou de stockage géologique montre souvent que les temps nécessaires à ces analyses peuvent être particulièrement longs (plusieurs années dans le cas du WIPP) et associés à des difficultés de maintien de l'installation dans un état sûr. Comme l'IRSN le mentionnait dans son examen du dossier « Maîtrise des risques en exploitation », il apparaît ainsi souhaitable que la gestion post-accidentelle soit anticipée afin de minimiser ces temps en vue d'assurer la disponibilité des filières d'évacuation de déchets dont [Cigéo](#) serait l'unique exutoire et favoriser une reprise de l'exploitation dans les conditions qui prévalaient avant la survenue de l'accident. **A cet égard, l'IRSN regrette qu'aucune disposition particulière ne soit étudiée par l'Andra au stade du [DOS](#) pour favoriser la reprise d'exploitation après un accident.** L'IRSN considère *a fortiori* qu'en amont de ces éventuelles dispositions, l'analyse des situations accidentelles de dimensionnement du [PUI](#) devraient comporter, dans l'étude de leurs conséquences, un volet relatif aux dispositions concrètes à mettre en œuvre pour reprendre l'exploitation de [Cigéo](#), en ne se limitant pas au retrait éventuel du (ou des) colis touché(s) par le sinistre, mais en élargissant l'analyse aux différents composants de [Cigéo](#) nécessaires à cette reprise (par exemple la ventilation, l'accès aux galeries, l'état des radiers, les capacités d'entreposage, etc.). A cet égard, **les demandes 2015 D11 et 2015 D12, ainsi que l'engagement 2014 E13 [1], qui demandaient des avancées sur ces aspects à l'échéance du [DOS](#), ne sont donc pas soldées.** L'IRSN appelle l'attention des conséquences éventuelles de la faible prise en compte des enjeux liés aux situations post-accidentelles au stade du [DOS](#) sur les orientations de l'[APD](#) en cours, en particulier sur les évolutions potentielles de conception qui favoriseraient le cas échéant la reprise d'exploitation après un accident.

Par conséquent, la prise en compte des situations post-accidentelles dans la conception fera l'objet d'une vigilance particulière de la part de l'IRSN lors de l'évaluation du dossier venant en support de la [DAC](#).

6.1.7 SURVEILLANCE

L'Andra indique que le programme de surveillance de Cigéo n'est pas fixé à ce stade et qu'une première proposition sera présentée dans le dossier en support à la DAC, sur la base des principes retenus au stade du DOS. A cet égard, la demande 2014 D33 de l'ASN [1] relative à la présentation des principes et objectifs retenus pour la définition du programme de surveillance de l'installation (incluant les colis) pendant sa phase de fonctionnement peut être considérée comme soldée.

Surveillance au regard de la sûreté en exploitation

L'Andra [39] prévoit de surveiller spécifiquement :

- les colis de déchets reçus,
- les effets du vieillissement,
- la maîtrise des différents risques examinés, en application du principe de défense en profondeur.

S'agissant des colis, en complément de la surveillance qui est menée en amont par l'Andra dans les installations des producteurs, le processus d'acceptation des colis fait partie des dispositions de surveillance, en lien par exemple avec l'exposition des travailleurs ou la puissance thermique maximale admissible. L'IRSN note que la description par l'Andra [39] des procédés mis en œuvre dans l'installation (cf. chapitre 2.6) comprend des opérations de contrôle des emballages de transport, colis primaires, conteneurs de stockage et colis de stockage (cf. Annexe T12). Ces contrôles sont susceptibles d'évoluer avec les réflexions en cours, en lien avec les études sur les spécifications d'acceptation des colis primaires destinés à Cigéo.

Aussi, l'IRSN considère que le dossier de DAC devra présenter la liste préliminaire et la nature des contrôles portant sur les emballages de transport et les colis (colis primaire, conteneur de stockage et colis de stockage), ainsi que les critères associés. Ce point fait l'objet de l'engagement E31-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

L'IRSN observe en outre que l'Andra n'a pas présenté à ce stade de disposition particulière pour des contrôles de type aléatoire visant à vérifier le dégagement de gaz ou le taux de vide des colis primaires, ni envisagé de contrôle destructif dans l'installation Cigéo. Néanmoins, compte tenu de l'ensemble des contrôles qui pourraient être réalisés dans le cadre du processus d'acceptabilité des colis primaires destinés à Cigéo, en lien avec les spécifications d'acceptation préliminaires des colis primaires que l'Andra s'est engagée à présenter à l'échéance de la DAC, l'IRSN estime que l'intérêt de disposer d'une cellule de contrôles adaptée devrait être évalué par l'Andra.

S'agissant des effets du vieillissement, en complément des opérations de jouvence planifiées et des contrôles réalisés dans le cadre de la maintenance préventive, des dispositions de surveillance seront mises en place pour détecter tout vieillissement précoce des matériaux et des équipements nécessaires au bon fonctionnement des installations. L'analyse par l'IRSN de la surveillance du vieillissement est présentée au chapitre 7.2.9.

S'agissant des risques liés à l'exploitation de l'installation, l'Andra décline les dispositions de surveillance qui seront mises en place, en particulier, pour l'ensemble des installations de Cigéo :

- la surveillance radiologique des zones nucléaires, des rejets liquides et gazeux, de l'environnement et des travailleurs (exposition interne et externe, dissémination),
- la surveillance associée aux risques d'incendie ou d'explosion,
- la surveillance du bon déroulement des opérations de manutention.

Ces aspects sont analysés dans les chapitres dédiés à chacun de ces risques (7.1.1 et 7.1.2, 7.2.1 et 7.2.2, et enfin 7.2.3).

La surveillance de l'installation souterraine vise également à apporter les données nécessaires à la maîtrise d'autres risques, tels que : perte de ventilation, coactivité, thermique, risque d'inondation interne, etc. De plus, l'Andra examine [39] les risques liés à la perte de la surveillance radiologique de l'installation, ce qui répond *pro-parte* à l'engagement 2010 E12 [1].

A ce stade, l'Andra n'identifie pas, pour chacun de ces risques, les paramètres devant être surveillés. L'IRSN n'est donc pas en mesure d'évaluer la faisabilité de la surveillance pour prévenir les risques en exploitation.

Surveillance au regard de la sûreté après fermeture

L'Andra établit [39], pour chacune des fonctions de sûreté après fermeture (voir chapitre 2.8.2) et chacun des composants remplissant une de ces fonctions, les besoins en termes de surveillance. **L'IRSN estime cette approche pertinente.**

Sur la liste des besoins identifiés, pour ce qui concerne la surveillance des alvéoles et colis de stockage **HA** vis-à-vis de la fonction « *limiter le relâchement des substances radioactives et les immobiliser dans le stockage* », l'Andra identifie le besoin de surveiller les conditions d'ambiance de l'alvéole (température, hygrométrie et présence d'eau liquide, présence d'O₂ ou d'H₂), la composition chimique de l'eau liquide récupérée en tête d'alvéole, les venues d'eau ou traces d'humidité en particulier au niveau de l'interface entre l'alvéole et les argilites, les déformations des chemisages et des colis et l'état de corrosion des conteneurs. Pour ce qui concerne la surveillance des alvéoles de stockage **MAVL** vis-à-vis de la même fonction de sûreté, l'Andra identifie le besoin de surveiller les conditions d'ambiance de l'alvéole ainsi que les déformations de l'alvéole et des colis, ainsi que les déplacements et l'état physico-chimique des colis. Pour la fonction « *retarder et atténuer la migration des radionucléides* », l'Andra identifie notamment la nécessité de surveiller la présence de radionucléides dans l'Oxfordien carbonaté alors qu'aucune mesure de surveillance relative à cette fonction n'est envisagée en sortie d'alvéoles **HA** et **MAVL**.

L'Andra a précisé au cours de l'instruction que le détail des paramètres à surveiller dans les alvéoles témoins est en cours d'identification. Leurs rôles et les fonctions des mesures spécifiques qu'ils abritent seront définis dans le dossier de **DAC**.

De manière générale, l'IRSN estime que l'Andra aurait dû poursuivre cet exercice en identifiant, à partir des phénomènes à surveiller dans chaque type de composant, les paramètres physiques nécessitant d'être suivis. L'Andra ne peut donc pas en déduire à ce stade quelles mesures correctives pourraient être apportées en cas d'observation d'une dérive dans les mesures. A cet égard, l'IRSN considère que la détermination des paramètres à surveiller et du seuil au-delà duquel leur dérive induit une action spécifique participe à la définition du domaine de fonctionnement de l'installation. Ainsi, l'engagement 2014 E7 [1] relatif à la présentation des paramètres clés qui gouvernent la sûreté à long terme de **Cigéo reste d'actualité.**

Dispositions de surveillance

En termes de stratégie de surveillance spatiale (qui concerne à la fois l'emplacement dans le composant et le principe de surveiller tous les composants ou seulement quelques-uns), l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que « *des tronçons d'ouvrages de l'installation souterraine, (des tronçons de descenderie et de puits, des tronçons de galerie ou des intersections, des alvéoles HA et MAVL), choisis pour leur caractère représentatif d'un ensemble d'ouvrages ou pour leur positionnement particulier (par exemple à l'emplacement d'un futur scellement) en regard*

des objectifs de sûreté en exploitation ou en après fermeture feront l'objet de mesures de surveillance spécifiques ». L'Andra se base ainsi sur l'utilisation de composants « témoins » (alvéoles, zones spécifiques...) plus instrumentés que le reste de l'installation dans la mise en œuvre future de son programme de surveillance. L'IRSN n'a pas d'objection sur ces principes, mais leur caractère très général à ce stade ne permet pas d'en évaluer la pertinence. De plus, l'Andra ne précise pas la stratégie de surveillance temporelle, par exemple si les mesures seront prises en continu ou ponctuellement.

Pour ce qui concerne les dispositions de surveillance en zone inaccessible dans l'installation souterraine, pour les alvéoles HA, l'auscultation sera réalisée exclusivement à l'entrée, par la bride (cf. chapitre 2.2.3.2). L'IRSN observe que ce mode d'auscultation ne permet *a priori* pas de suivre une éventuelle variabilité d'un paramètre au sein de l'alvéole. Pour les alvéoles MAVL, le principe d'une surveillance d'ambiance et non colis par colis est retenu par l'Andra. Or, l'IRSN estime qu'il conviendra de démontrer le caractère fiable d'une mesure d'ambiance dans l'alvéole pour identifier une dérive de comportement d'un ou plusieurs colis. En outre, si une telle dérive était constatée, l'Andra n'a pas précisé les moyens envisagés à ce stade pour identifier le ou les colis potentiellement défectueux. Enfin, les conditions dans lesquelles un retrait devrait être décidé ne sont pas non plus définies. L'ensemble de ces points spécifiques à la surveillance sont examinés dans les chapitres consacrés à l'examen par l'IRSN de l'analyse des risques effectuée par l'Andra.

En règle générale, l'Andra [40] n'apporte que peu d'éléments techniques relatifs à cette surveillance. Or, une partie non négligeable de ces éléments techniques devrait être apportée au travers d'essais *in situ* et en laboratoire, en particulier pour ce qui concerne les technologies de capteurs qui pourraient être mises en œuvre dans le stockage. A cet égard, l'IRSN relève que les résultats du projet Européen Modern2020, dont l'Andra est le pilote, devraient être disponibles en juin 2018 et ainsi permettre à l'Andra d'apporter des précisions pour la DAC. L'IRSN s'interroge cependant sur la possibilité que certains paramètres ne puissent être correctement surveillés dans les configurations d'alvéoles actuellement retenues. Or, l'Andra a indiqué qu'« à ce stade, il n'est pas prévu d'adapter les concepts aux moyens de surveillance ». L'IRSN appelle l'attention sur ce point, qui a déjà fait l'objet de remarques de sa part, notamment au cours de l'instruction du dossier « Maîtrise des risques en exploitation ». **En tout état de cause, l'IRSN considère toujours que la surveillance de l'installation reste un élément essentiel à la fois de la maîtrise des risques en exploitation et de la vérification progressive de l'atteinte d'un état spécifié du système de stockage au moment de sa fermeture, sur lequel se fonde la sûreté à long terme. A ce titre, l'IRSN estime que l'Andra devra montrer que des solutions techniques robustes ne conduisant pas à dégrader les performances des composants peuvent être mises en œuvre pour répondre aux besoins identifiés en termes de surveillance.**

Enfin, de manière générale, l'IRSN considère que la surveillance des éléments importants pour la protection (EIP), en particulier des éléments inaccessibles en exploitation, devrait faire l'objet d'une AIP et être précisée dans le rapport préliminaire de sûreté.

6.2 DEMARCHE DE SURETE POUR LA PHASE APRES FERMETURE

6.2.1 DEMARCHE D'IDENTIFICATION ET DE CLASSIFICATION DES SCENARIOS

L'Andra indique que l'évaluation de sûreté en phase après fermeture présentée au stade du DOS comprend d'une part l'analyse qualitative des incertitudes associées à l'évolution future des composants du stockage, d'autre part l'évaluation quantitative de la prise en compte de ces incertitudes en regard de l'impact radiologique. L'Andra

précise que, pour un composant contribuant à une fonction de sûreté (cf. chapitre 2.8.2), l'analyse qualitative conduit à examiner si les risques et incertitudes identifiés peuvent affecter la réalisation de la fonction de sûreté et l'atteinte des performances allouées à ce composant et/ou avoir une influence sur un autre au regard de ses fonctions de sûreté et performances associées. L'Andra déduit de l'analyse des incertitudes qu'elle présente dans le **DOS**, menée sur la base des options de sûreté retenues, des scénarios d'évolution du stockage classés selon leur probabilité d'occurrence. L'Andra définit :

- le scénario d'évolution normale « **SEN** », ou « *domaine d'évolution normale* », qui rassemble les évolutions du stockage les plus probables après sa fermeture et considère que toutes les fonctions de sûreté définies sont satisfaites ;
- des scénarios d'évolution altérée « **SEA** », qui visent à évaluer les conséquences de dysfonctionnement de composants pouvant entraîner une dégradation significative de sa performance ou une perte d'une fonction faisant sortir le système de stockage du domaine d'évolution normale et à vérifier les lignes de défense ;
- des scénarios de type « *What-if* » qui permettent de tester la robustesse du système de stockage.

Les scénarios retenus sont les suivants :

- un **SEN** qui couvre deux situations associées au domaine d'évolution normale ;
- trois scénarios de dysfonctionnement de type **SEA** des ouvrages de fermeture (dysfonctionnement par l'interface des scellements) et quatre scénarios de dysfonctionnement de type *What-if* des ouvrages de fermeture (dysfonctionnement par l'interface des scellements couplé à une défaillance du noyau argileux) ;
- deux scénarios de dysfonctionnement de type **SEA** des conteneurs de stockage **HA** (dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage **HA0**) et un scénario de dysfonctionnement de type *What-if* des conteneurs de stockage **HA** (dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage **HA**) ;
- un scénario de type *What-if* relatif au Callovo-Oxfordien (discontinuité non détectée).

6.2.2 DEFINITION DU DOMAINE D'EVOLUTION NORMALE

L'Andra a précisé au cours de l'instruction que le domaine d'évolution normale est encadré par les deux situations suivantes (cf. Figure 73) :

- la situation correspondant au meilleur de la connaissance qui s'appuie sur la connaissance scientifique et technologique disponible, en appliquant un degré de conservatisme variable en fonction du niveau de connaissance et des incertitudes résiduelles. L'Andra précise que ce degré de conservatisme est minimal lorsque la connaissance scientifique et technologique est suffisamment étayée, notamment par une caractérisation détaillée et un nombre suffisant de mesures sur les mécanismes / processus / données des différents matériaux. Cette situation est désignée comme étant la situation « *de référence* » par l'Andra ;
- la situation correspondant au fonctionnement de **Cigéo** tel que spécifié par l'Andra dans ses « exigences » [55] (cf. chapitre 2.8.2). Dans le cas où aucune exigence n'est spécifiée pour les composants contribuant aux fonctions de sûreté, l'Andra indique retenir des caractéristiques conservatives fondées sur la connaissance. La situation correspondant aux exigences conduit, de par le choix d'un cumul d'hypothèses conservatives, à majorer la quantité et la vitesse de transfert des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien, puis au travers des formations encaissantes jusqu'au Barrois.

L'Andra définit cette situation comme « *enveloppe* » au stade du **DOS**. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que cette situation conduit à évaluer l'impact radiologique maximal pour le domaine d'évolution normale.

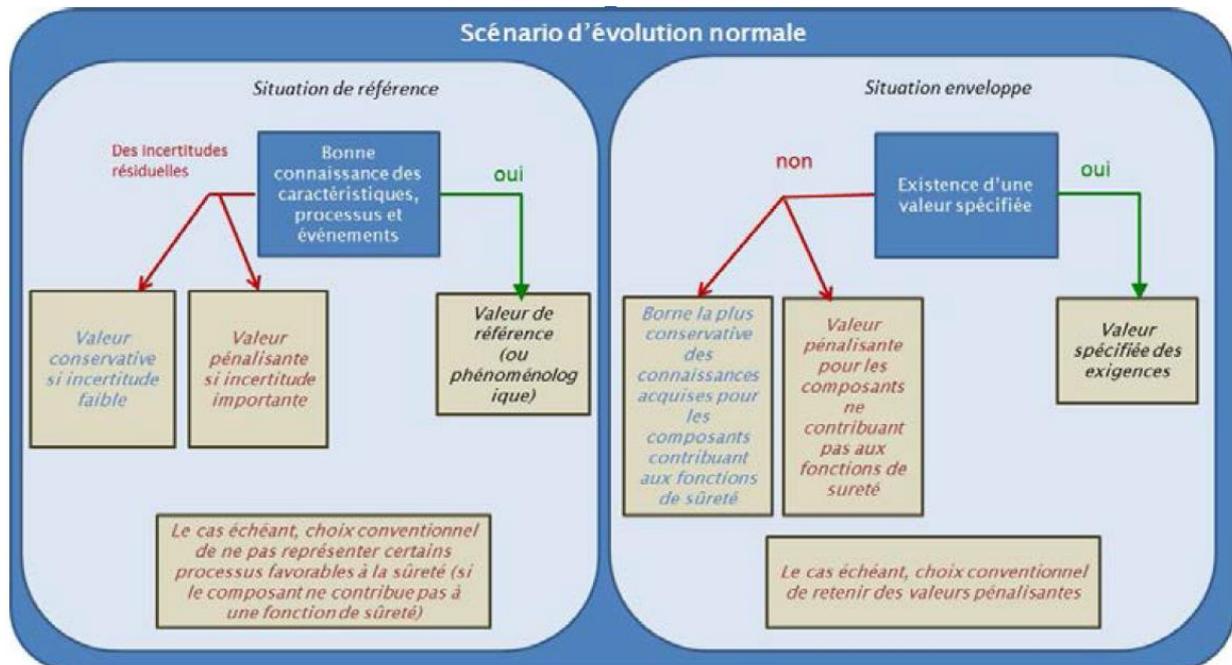


Figure 73 - Choix des hypothèses et des données pour les situations « *de référence* » et « *enveloppe* » (transmis par l'Andra au cours de l'instruction)

L'IRSN note que le domaine d'évolution normale est défini, dans le **DOS**, par deux situations au lieu d'une seule, voulue conservatrice, dans les dossiers précédents. Ces deux situations ont pour but, pour l'évolution normale, d'estimer l'impact radiologique attendu au regard des connaissances actuelles, en complément de l'impact radiologique maximal qui tient compte de l'ensemble des incertitudes résiduelles ou des valeurs spécifiées (cf. « exigences applicables » [55]). **Ceci est satisfaisant sur le principe.**

L'IRSN relève que les paramètres visés par ces valeurs spécifiées peuvent être liés à des choix architecturaux, par exemple l'épaisseur d'argilite saine entre les ouvrages et les formations encaissantes ou la distance entre la zone centrale des puits et les quartiers de stockage. Elles peuvent être également liées à une performance des composants du stockage, par exemple la durée d'étanchéité des conteneurs de stockage **HA** et les propriétés hydrauliques du noyau argileux des scellements. L'IRSN estime que la notion de valeurs spécifiées est pertinente pour des choix relevant de l'architecture globale du stockage. Toutefois, cette notion ne devrait pas être appliquée pour caractériser un composant du stockage remplissant une fonction de sûreté sur le long terme dont la démonstration de la performance n'a pas été pleinement apportée. **À cet égard, l'IRSN considère que la notion de conservatisme, par ailleurs retenue par l'Andra dans la situation « *enveloppe* », est plus adaptée et devrait être appliquée pour explorer l'influence des incertitudes liées aux propriétés des composants contribuant à une ou plusieurs fonctions de sûreté.**

Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que, pour la **DAC**, des études de sensibilité mono et multiparamétriques déterministes et probabilistes seront menées, en considérant les domaines d'incertitudes des différents paramètres. Ces études de sensibilité auront notamment pour objectif, d'évaluer le poids des paramètres influant sur les indicateurs retenus et prendront en compte les corrélations entre paramètres afin de préserver un réalisme vis-à-vis de la physique des processus (exemple d'une forte perméabilité avec une forte diffusion). Ainsi, l'Andra prévoit pour la **DAC** de définir le domaine d'évolution normale du stockage par un ensemble d'évolutions probables analysées au travers d'études de sensibilité aux paramètres et d'évaluer l'impact maximal de ce stockage à l'aide d'une

situation, qualifiée d'« *enveloppe* ». L'IRSN considère que cette démarche est satisfaisante dans son principe et que son application devrait conduire à évaluer une valeur enveloppe de l'impact du stockage en tenant compte des incertitudes associées à son évolution attendue. Toutefois, au stade du **DOS**, cette démarche ne peut s'appliquer pleinement compte tenu de l'absence d'études de sensibilité (déterministes et probabilistes) aux propriétés hydrauliques et physico-chimiques des composants du stockage. Aussi, au stade du **DOS**, l'évaluation du caractère majorant de la situation « *enveloppe* » retenue par l'Andra ne peut être examinée que sur la base du caractère conservatif des valeurs de paramètres retenues par l'Andra. L'IRSN estime donc que la demande de l'ASN 2013 D6 [1] de combiner plus systématiquement approches déterministe et probabiliste, notamment pour évaluer l'impact du stockage, reste d'actualité en particulier pour la **DAC**.

Au stade du **DOS**, l'Andra présente une étude de sensibilité aux éléments d'architecture de l'installation souterraine de **Cigéo** (longueur et diamètre de galeries, section des puits, nombre et performance hydraulique des scellements) en considérant la situation « *de référence* » du domaine d'évolution normale et les scénarios de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture. Cette étude de sensibilité a permis, selon l'Andra, de tester la robustesse de l'installation souterraine de **Cigéo**, en termes de performances après-fermeture, vis-à-vis d'éventuelles évolutions d'architecture. Les résultats de ces études de sensibilité basées sur des alternatives architecturales sont analysés au chapitre 8.2.4. A ce stade, l'IRSN relève que ces études contiennent des compléments d'information et de justification pour différents critères et choix spécifiés par l'Andra dans ses « *exigences* » [55], et abordent des pistes d'optimisation qui peuvent éclairer sur les choix effectués *in fine* par l'Andra pour le concept de **Cigéo**. A ce titre, l'IRSN estime que cette étude de sensibilité apporte des éléments de réponse à la demande 2013 D13 [1] relative à la justification de la longueur minimale de galeries entre les alvéoles de stockage et les liaisons surface-fond, et s'inscrit dans l'esprit de la demande de l'ASN 2014 D2 [1] relative aux marges supplémentaires apportées par l'architecture de stockage en cas de défaillance d'une ou plusieurs barrières pour ce qui concerne la sûreté du stockage en phase d'après fermeture, ce qui est satisfaisant. L'IRSN souligne néanmoins, sur la base de l'analyse des résultats (cf. chapitre 8.2.4), que certains éléments de réponse ne permettent pas de solder la demande 2014 D2.

6.2.3 SCENARIOS D'EVOLUTION ALTEREE

Au stade du **DOS**, l'Andra présente les causes de dysfonctionnement d'un ou de plusieurs composant(s) du stockage pouvant entraîner une dégradation significative de sa performance ou la perte d'une fonction (ou sous-fonction) de sûreté suivante :

- s'opposer à la circulation d'eau ;
- isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions humaines ;
- limiter le relâchement des radionucléides et toxiques chimiques et les immobiliser dans le stockage (sous-fonctions : protéger les déchets de l'eau, limiter la mise en solution ou la mobilité des radionucléides) ;
- retarder et atténuer la migration des radionucléides (sous-fonctions : retarder et atténuer le flux longitudinal de radionucléides relâchés dans les ouvrages ou la migration de radionucléides dans la formation hôte du Callovo-Oxfordien, préserver la capacité naturelle de dispersion et de dilution des formations encaissantes).

L'Andra indique que ces pertes de fonctions de sûreté sont répertoriées dans des scénarios altérés ou *What-if*, selon les causes de dysfonctionnement identifiées et leur vraisemblance, sur la base de l'approche qualitative suivante :

- si les causes de dysfonctionnement identifiées sont peu vraisemblables, des [SEA](#) sont alors définis. Ils visent à évaluer les conséquences de la dérive dans le temps du système de stockage et de vérifier les lignes de défense ;
- si les causes de dysfonctionnement sont très peu vraisemblables, des scénarios de type « *What-if* » sont définis pour tester la robustesse du système de stockage au même titre que les évaluations complémentaires de sûreté mises en œuvre en sûreté exploitation.

En vertu de cette approche, l'Andra décline des scénarios de dysfonctionnement des scellements qui considèrent une dégradation de la fonction de sûreté « *s'opposer à la circulation de l'eau* ». L'Andra estime que le dysfonctionnement impliquant l'interface entre le noyau argileux et le Callovo-Oxfordien est traité dans des scénarios [SEA](#) car les causes de ce dysfonctionnement sont peu vraisemblables. La perte de la fonction de sûreté « *s'opposer à la circulation de l'eau* » est en revanche étudiée au travers de scénarios *What-if*, (donc très peu vraisemblables), dans lesquels est postulé le cumul de défaillances du noyau argileux et de l'interface entre le noyau argileux et le Callovo-Oxfordien.

L'Andra présente en outre des scénarios [SEA](#) postulant la perte partielle de la sous-fonction de sûreté « *protéger les déchets de l'eau* » par perte d'étanchéité prématurée de l'ensemble des conteneurs de stockage de la zone [HA0](#), ce qui conduit, selon l'Andra, à exposer la matrice vitreuse à des conditions d'environnement (dont la température) entraînant une dégradation de ses performances et en conséquence une dégradation de la fonction « *limiter le relâchement des substances radioactives et les immobiliser dans le stockage* ». La perte totale de la sous-fonction de sûreté « *protéger les déchets de l'eau* » par perte d'étanchéité de l'ensemble des conteneurs de stockage [HA](#), qui conduit également à la perte de la fonction « *limiter le relâchement des substances radioactives et les immobiliser dans le stockage* » est jugée très peu vraisemblable et donc traitée par l'Andra dans un scénario *What-if*. Pour ces scénarios, l'Andra prend en compte un relâchement immédiat dès la fermeture du stockage de l'activité contenue dans les colis [HA0](#) et/ou [HA](#). Il est à noter que l'Andra ne postule pas de perte partielle ou totale d'une fonction de sûreté des colis [MAVL](#), car l'Andra ne retient pas, au stade du [DOS](#), de capacité pour ces colis de « *limiter le relâchement des substances radioactives et les immobiliser dans le stockage* » à long terme.

S'agissant d'un scénario postulant la présence d'une discontinuité non détectée du Callovo-Oxfordien, l'Andra estime, notamment au regard de l'interprétation des résultats de la sismique 3D menée sur la [ZIRA](#), que ce scénario répondant à la demande de l'ASN 2013 D3 [1] est très peu vraisemblable. Aussi, l'Andra traite cette hypothèse dans le cadre d'un scénario *What-if* pour lequel elle considère une perte locale des fonctions « *s'opposer à la circulation de l'eau* » et « *retarder et atténuer la migration des substances radioactives et toxiques chimiques* ». L'IRSN relève qu'au stade du [DOS](#), ce scénario n'a pas été étudié. L'IRSN estime donc que la demande de l'ASN 2013 D3 formulée à l'issue de l'examen du dossier « Etudes remises depuis 2009 », suite à l'identification d'anomalies sur le bloc de sismique 3D sur la [ZIRA](#) pour lesquelles l'interprétation en termes de structures ne pouvait pas être totalement exclue, reste donc d'actualité, d'autant plus que l'Andra n'a pas réduit l'incertitude par de nouvelles investigations ou un retraitement de la sismique 3D. L'IRSN estime en outre, ainsi qu'indiqué au chapitre 8.1.2 relatif au risque sismique après fermeture, qu'un tel scénario permettrait de couvrir l'incertitude résiduelle sur la possibilité de propagation d'une discontinuité à long terme. Enfin, la revue du groupe d'experts réunis par l'[AIEA](#) effectuée à l'automne 2016 [8] a également recommandé que l'hypothèse d'une structure conductrice soit retenue dans le cadre d'un scénario *What-if*.

L'IRSN relève qu'au travers d'une approche qualitative de la vraisemblance des causes de dysfonctionnements des composants, l'Andra définit une sélection de scénarios qui permet de vérifier la sûreté du stockage dans des conditions défavorables. Au stade du **DOS**, l'IRSN n'a pas analysé le degré de vraisemblance des scénarios retenus par l'Andra, mais considère que la sélection des **SEA** et **What-if** est pertinente pour vérifier la robustesse de l'installation souterraine vis-à-vis d'un dysfonctionnement de scellements ou de conteneurs **HA**.

Toutefois, l'IRSN constate que pour ce qui concerne l'objectif de « *préserver les propriétés favorables des argilites* » dans le cadre de la fonction de sûreté « *retarder et atténuer la migration des substances radioactives* », l'Andra ne prévoit de tester que la robustesse du concept de stockage vis-à-vis d'une discontinuité de la roche hôte. Or, l'IRSN observe que l'épaisseur de garde d'argilites saines exigée au droit des zones de stockage joue un rôle clé dans la démonstration de la sûreté après fermeture de **Cigéo** et que l'Andra n'identifie pas de scénarios qui rendraient compte d'une variabilité de cette épaisseur. Parmi les scénarios qui pourraient mener à une diminution de la garde de roche saine, l'IRSN identifie pourtant le cas d'un défaut de soutènement de la roche (ou de remblayage lors d'opérations de fermeture) conduisant à un endommagement non maîtrisé de la roche. L'Andra [40] ne teste pas une telle situation au motif que « *les ouvrages et équipements non accessibles notamment les alvéoles de stockage et les conteneurs de stockage font l'objet d'une conception avec des marges de dimensionnement permettant d'atteindre un haut de degré de confiance quant à leur fiabilité sur la période d'exploitation envisagée* ». Or, ce cas pourrait survenir :

- lors de l'excavation des galeries, à la suite d'un effondrement ou d'un éboulement d'une partie de l'ouvrage ;
- lors de l'exploitation de l'installation souterraine, à la suite d'une malfaçon, d'un défaut de contrôle, de maintenance ou de dimensionnement des revêtements des galeries ;
- lors des opérations de fermeture du stockage, à la suite d'une non-conformité du remblai.

Ainsi qu'indiqué au chapitre 4.5.4.2, l'IRSN estime que ces deux derniers cas pourraient résulter d'un abandon de tout ou partie du stockage suite, par exemple, à des bouleversements socio-économiques, impliquant par exemple une perte de financement ou de contrôle institutionnel. Bien que ces scénarios apparaissent peu probables, ils ne peuvent être totalement exclus sur la durée séculaire d'exploitation de **Cigéo** et doivent être pris en compte au regard des conséquences potentielles sur le transport des radionucléides hors du stockage.

Ainsi, l'IRSN estime qu'au stade du **DOS**, un scénario d'effondrement pendant l'excavation des galeries aurait dû être retenu, au moins pour s'assurer que la conception de **Cigéo** prévoit en fonction de l'évaluation des conséquences, les actions à mettre en œuvre à la suite d'un tel événement, telles que par exemple des travaux complémentaires en vue de renforcer le soutènement dans le cas où l'épaisseur de garde a pu être préservé, ou encore des dispositions compensatoires sur l'architecture de **Cigéo** afin d'éloigner suffisamment les zones de stockage de déchets des zones concernées. De même, d'autres scénarios pendant l'exploitation ou la fermeture du stockage auraient pu être envisagés, afin de prévoir les dispositions spécifiques de surveillance des ouvrages et les modalités d'intervention en cas de déviation constatée entre le comportement attendu et celui identifié (convergence ou fissuration anormale des ouvrages...), voire d'effondrement. En particulier, l'IRSN observe d'une part que ces dispositions d'intervention sur les ouvrages apparaissent difficiles à mettre en œuvre dans les zones dites inaccessibles, telles que par exemple les alvéoles **MAVL**, d'autre part qu'un effondrement en tête d'alvéole en cours de remplissage pose la question de la poursuite du remplissage de l'alvéole ou de sa fermeture anticipée selon des modalités à définir, par exemple en mettant en œuvre la récupérabilité des colis déjà stockés.

Aussi, l'IRSN estime qu'afin de tester la robustesse du concept de stockage, l'Andra devra évaluer, dans le dossier de DAC, les conséquences sur la sûreté à long terme d'un scénario conventionnel d'effondrement qui pourrait conduire à une diminution de l'épaisseur de garde saine de roche hôte, au cours de la phase d'exploitation de Cigéo, dans l'installation souterraine à proximité de colis stockés. L'Andra identifiera, le cas échéant, les dispositions complémentaires qui pourraient être mises en œuvre pour limiter les conséquences d'un tel scénario. Ce point fait l'objet de l'engagement E29-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

Enfin, l'Andra évalue les conséquences d'une intrusion humaine involontaire en considérant la perte locale de la fonction « *isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions de l'homme* » par le scénario d'exposition à des carottes de forage contenant des déchets et des fonctions « *s'opposer à la circulation de l'eau* » et « *retarder et atténuer la migration des substances radioactives et toxiques chimiques* » par les scénarios d'intrusion par forage dans les alvéoles MAVL ou dans les galeries d'accès aux alvéoles HA. L'IRSN relève que la démarche de l'Andra s'inscrit dans les réflexions du projet HIDRA⁵⁵ de l'AIEA sur l'utilisation de scénarios stylisés, en particulier basés sur des forages intrusifs pour les stockages en profondeur, dont les conséquences à long terme de ces situations de forage sont évaluées dans le chapitre 8.2.5. Il est à noter néanmoins que l'Andra fait intervenir dans sa description des scénarios d'intrusion des notions d'occurrence (scénarios SEA et What-if). Or, les membres du projet HIDRA et la revue du groupe d'experts réunis par l'AIEA effectuée à l'automne 2016 [8], estiment qu'il n'existe pas de base scientifique pertinente pour prédire l'occurrence de situations de forage. Ces situations ne peuvent donc être classées selon leur probabilité. Ainsi, l'AIEA [8] préconise que l'Andra traite les scénarios d'intrusion humaine en évitant tout jugement sur leur occurrence.

6.2.4 DEMARCHE DE SELECTION DES BIOSPHERES

L'Andra évalue l'impact des rejets d'effluents radioactifs de l'installation pour la période d'après-fermeture sur la base de la démarche de sélection de biosphère préconisée par l'AIEA [124]. Cette méthode d'évaluation est basée sur la représentation conceptuelle de l'environnement en « biosphères » de référence, correspondant à un écosystème (par exemple, espèces animales, végétales, types de cultures, etc.), à un type de population humaine (ex : sédentaires, chasseurs-cueilleurs, etc.) et à des voies d'exposition (par exemple, consommation de produits agricoles, consommation d'eau issue de forages en nappe, etc.) représentatifs de conditions climatiques données.

Sur la base d'études sur l'évolution du climat, tenant compte de l'évolution naturelle et des effets anthropiques, et sur l'évolution géomorphologique de la ZIRA, l'Andra identifie cinq biosphères types qu'elle considère équiprobables. Ces biosphères types considérées par l'Andra comme plausibles à long terme sont (i) une biosphère type tempérée, (ii) une biosphère type boréale, (iii) une biosphère type toundra, (iv) une biosphère type climat chaud subtropical à pluie d'hiver et (v) une biosphère type climat chaud subtropical humide. Toutefois, pour l'évaluation d'impact à long terme du stockage, l'Andra prévoit ne considérer pour la DAC que la biosphère type tempérée, la biosphère type boréale et la biosphère type climat chaud subtropical humide. En effet, l'Andra estime que la biosphère type climat chaud subtropical à pluie d'hiver n'existerait qu'au cours des prochains 50 000 ans, alors que le panache des radionucléides n'aura pas atteint les exutoires du Barrois et du Dogger, et que la biosphère type toundra peut être écartée en raison de la présence d'un pergélisol qui limite l'accessibilité de l'eau en

⁵⁵ HIDRA : Human Intrusion in the context of Disposal of Radioactive Waste. Le projet HIDRA est un projet AIEA qui aborde la prise en compte d'intrusion humaine involontaire dans les évaluations de l'impact à long terme de l'installation de stockage.

profondeur et de l'absence d'exutoire naturel par les rivières. L'IRSN estime que les justifications apportées par l'Andra pour écarter ces biosphères, compte tenu des incertitudes inhérentes à ce type de prédiction et des remarques formulées par l'IRSN au chapitre 8.2.1.3 sur la présence d'exutoires en surface pour l'aquifère de l'Oxfordien, ne sont pas à ce stade suffisantes. Il conviendrait donc que pour la **DAC**, ces justifications soient davantage étayées afin de définitivement écarter ces biosphères de l'évaluation de l'impact après fermeture.

S'agissant du choix des groupes de référence hypothétiques, l'Andra s'appuie [83] sur la description des biosphères types (climat, végétation, faune, sols, géomorphologie, géologie, hydrologie, et hydrogéologie, et activités humaines) et sur l'exploitation plausible de ces environnements, incluant les caractéristiques des exutoires du Barrois et du Dogger retenus et les activités humaines possibles par leur utilisation. Au stade du **DOS**, l'Andra décrit les régimes alimentaires et les activités des groupes de référence hypothétiques sur la base d'enquêtes qu'elle a menées sur les habitudes de vie des populations vivant actuellement dans la région de **MHM** pour la biosphère type tempérée et, pour la biosphère chaude tropicale humide, d'enquêtes menées en Espagne. L'Andra retient, pour l'évaluation de l'impact, le groupe de référence hypothétique « multi-activités », pour lequel elle postule que les individus en faisant partie sont exposés à toutes les voies d'exposition identifiées (par ingestion suite à la consommation de divers produits animaux et végétaux, par inhalation et exposition externe du fait de ses activités extérieures), et estime que ce groupe consomme en autarcie complète les produits issues de ses activités.

L'IRSN n'a pas examiné, dans le cadre du **DOS**, l'ensemble des données (voies d'exposition, facteurs de transfert, taux d'ingestion...) relatives aux trois biosphères sélectionnées (tempérée, boréale et subtropicale humide). Toutefois, l'IRSN relève que l'Andra ne retient pas les voies d'exposition relatives à des activités de chasse et de pêche, étant donné l'absence d'exutoires naturels par rivières dans ses modélisations hydrogéologiques, ce qui revient à ne pas prendre en compte la consommation de poissons de rivière et de gibiers pour le groupe « multi-activités ». L'IRSN relève néanmoins que l'enquête sur les régimes alimentaires (éléments de l'enquête « OPE », transmis au cours de l'instruction) réalisée par l'Andra montre que la consommation de gibiers et de poissons de rivière est relativement faible par rapport à la consommation des autres produits issus des animaux pour un groupe vivant en autarcie complète. Par ailleurs, l'Andra ne retient pas la possibilité d'une irrigation des cultures céréalières avec des eaux pompées dans le Dogger. Aussi, le groupe de référence « multi-activités » et les facteurs de conversion associés à chaque biosphère définis pour l'exutoire du Barrois différent de ceux retenus pour l'exutoire du Dogger. L'IRSN remarque que ces facteurs de conversion sont néanmoins du même ordre de grandeur. Les évaluations de l'impact réalisées par l'Andra ne devraient donc pas être remises en cause. **L'IRSN estime néanmoins que la justification d'hypothèses liées aux activités des groupes de référence, menant à exclure certaines voies d'exposition (gibiers et poissons de rivière pour un exutoire naturel, culture céréalière pour l'exutoire Dogger), mériterait d'être plus poussée dans la démonstration de l'Andra.**

En tout état de cause, l'IRSN estime que les éléments présentés dans ce dossier constituent des premiers éléments de réponse à la demande 2011 R18 [1] de l'ASN émise à l'issue de l'instruction du « Dossier 2009 » (recommandation initialement formulée par le **GPD** à l'issue de l'examen du « Dossier 2005 »), relative à la nécessité de poursuivre les travaux visant à conforter les hypothèses relatives aux biosphères envisageables sur le site retenu en vue de la **DAC**.

Ainsi, au stade du **DOS**, l'Andra estime l'impact dosimétrique pour les scénarios d'évolution normale ainsi qu'une partie des **SEA** et scénarios *What-if*. Ces estimations sont examinées au chapitre 8.2 du présent rapport.

En revanche, l'impact sanitaire des substances chimiques relâchées par **Cigéo** après fermeture n'est pas présenté par l'Andra. A cet égard, l'IRSN rappelle que l'évaluation de l'impact à long terme des substances chimiques relâchées par l'installation devra être présentée dans le dossier accompagnant la **DAC**, au même titre que l'impact radiologique, conformément à l'article 9 du décret « procédure » n°2007-1557 du 2 novembre 2007 [139] ainsi qu'au

Guide de l'ASN relatif au stockage géologique [3]. Or, comme indiqué au chapitre 3.3 du présent rapport, la méthode de sélection des substances retenues par l'Andra n'est cependant pas présentée dans le **DOS**. A cet égard, l'IRSN souligne que l'INERIS préconise dans ses guides de 2003 [125] et 2013 [126] que la sélection des substances d'intérêt soit effectuée sur la base d'un inventaire exhaustif des substances chimiques potentiellement rejetées par l'installation, de manière à :

- sélectionner les substances à la fois parmi les plus toxiques, les plus émises et les plus bio-accumulées ;
- retenir prioritairement comme traceur de risque les substances classées cancérigènes, mutagènes ou reprotoxiques ;
- sélectionner au minimum un élément de chaque famille chimique de substances identifiées au cours de la caractérisation des émissions.

En outre, l'IRSN observe que l'Andra ne présente ni la démarche ni une première évaluation d'impact des relâchements par l'installation à long terme sur l'environnement. L'IRSN rappelle que cette évaluation constitue également un élément de l'étude d'impact accompagnant la **DAC**. Aussi, compte tenu de l'absence d'évaluation de l'impact chimique sur la population et de l'absence d'impact du stockage sur l'environnement, l'IRSN estime que la demande 2014 D31 [1] de l'ASN relative à la présentation dans le **DOS** des situations retenues *in fine* pour le dimensionnement de l'installation n'est pas pleinement soldée.

7 EVALUATION DE SURETE EN PHASE D'EXPLOITATION

Le présent chapitre présente l'examen par l'IRSN de l'évaluation de sûreté effectuée par l'Andra, relative aux installations de surface et souterraine de [Cigéo](#) lors de son exploitation. Il porte d'abord sur les risques internes nucléaires, c'est-à-dire ceux inhérents aux déchets, que sont l'exposition interne et externe, la dissémination, la criticité et la thermique. Les risques liés à l'exploitation nucléaire de [Cigéo](#), dits d'« agression interne » tels que l'incendie, l'explosion, la manutention ou l'activité humaine sont ensuite examinés. Les potentielles « agressions externes » aux activités de [Cigéo](#) sont également analysées, telles que des aléas naturels sismiques ou climatiques ou des activités industrielles. Puis l'IRSN examine la gestion par l'Andra des situations accidentelles et post-accidentelles, l'évaluation des situations extrêmes, la surveillance et enfin la sûreté des opérations liées à la fermeture du stockage.

L'IRSN appelle l'attention sur les fortes réserves qu'il émet vis-à-vis du stockage en l'état des colis d'enrobés bitumineux, sur la base des risques liés à l'incendie dans un alvéole [MAVL](#), présentées au chapitre 7.2.1.7 du présent rapport. Si toutefois l'option de ce stockage était maintenue, plusieurs remarques concernant des compléments à apporter en vue de la [DAC](#) sont formulées dans la suite de ce rapport.

7.1 RISQUES INTERNES D'ORIGINE NUCLEAIRE

7.1.1 EXPOSITION INTERNE ET EXTERNE

Les deux types d'exposition de l'organisme humain aux rayonnements ionisants sont l'exposition externe à ces rayonnements lorsque la personne se trouve exposée de l'extérieur par des rayonnements ionisants émis par une source radioactive située dans son voisinage et l'exposition interne aux particules radioactives, quand des éléments radioactifs ont pénétré à l'intérieur de l'organisme, par inhalation, ingestion ou encore par contact direct avec la peau ou une plaie.

Les « objectifs » de dose individuelle annuelle pour les travailleurs retenus par l'Andra pour l'exploitation de [Cigéo](#) font l'objet du chapitre 6.1.1 du présent rapport.

7.1.1.1 Exposition interne

L'Andra indique [39] que les risques d'exposition interne en fonctionnement normal sont liés essentiellement à l'inhalation de gaz radioactifs émis par les colis [MAVL](#) et à la mise en suspension et aux transferts par contact de la contamination labile présente à la surface des colis de déchets. S'agissant de l'exposition interne par inhalation de gaz radioactifs, l'Andra précise que ce risque reste faible comparé aux risques d'exposition externe (cf. *infra*). Pour ce qui concerne la contamination labile, l'Andra retient comme valeur 4 Bq/cm² pour les radionucléides émetteurs bêta et gamma et 0,4 Bq/cm² pour les radionucléides émetteurs alpha, au-delà desquels l'Andra considère que les colis sont contaminés. Comme lors de l'instruction du dossier « Maîtrise des risques en exploitation », l'IRSN observe que ces seuils sont cohérents avec la définition de la contamination surfacique issue de l'arrêté du 1^{er} juin 2001 modifié, relatif au transport de matières dangereuses par route (arrêté dit ADR [209]).

S'agissant du radon (gaz radioactif d'origine naturelle issu de la désintégration de l'uranium et du radium présents dans la croûte terrestre qui peut s'accumuler dans les espaces clos) l'Andra a présenté au cours de l'instruction le bilan de plusieurs campagnes de mesure de la concentration atmosphérique en radon 222 dans les galeries ventilées du Laboratoire souterrain. Ces campagnes réalisées en 2005, 2010, 2014 et 2016 montrent des valeurs d'activité

volumique en radon 222 (inférieures à 200 Bq/m³) inférieures au seuil d'action⁵⁶ de 400 Bq/m³ défini par la décision n°2008-DC-0110 de l'ASN [233] relative à la gestion du risque lié au radon dans les lieux de travail. L'Andra précise que selon les arrêtés relatifs à la gestion du risque lié au radon dans les lieux ouverts au public [132] et dans les lieux de travail [133], il n'est pas imposé la mise en place d'une surveillance particulière de l'activité volumique en radon dans les zones pouvant accueillir du public ou des travailleurs étant donné que l'installation est située dans le département de la Meuse (55) qui ne figure pas dans la liste des départements devant faire l'objet d'une surveillance. L'IRSN rappelle que la directive 2013/59/Euratom du Conseil du 5 décembre 2013 [208], qui est en cours de transposition dans la réglementation française, prévoit d'une part un niveau de référence de la concentration d'activité en radon dans l'air n'excédant pas 300 Bq/m³ dans les zones de travail ainsi que la définition d'une liste des types de lieux de travail, y compris souterrains, où des mesures doivent être effectuées sur la base d'une évaluation des risques et ce indépendamment de la localisation géographique. **Il conviendra que l'Andra vérifie, lors de mesures *in situ* durant les travaux de creusement de l'installation, que les valeurs d'activité en radon dans l'installation souterraine ne nécessitent ni la mise en place d'une surveillance ni la mise en œuvre d'actions spécifiques pour réduire l'exposition des personnes.**

En situations incidentelle et accidentelle, l'Andra indique [39] que le risque d'exposition interne est essentiellement lié à la rupture du confinement des colis ou d'autres équipements (cuves d'effluents, filtres THE...) contenant des substances radioactives. Les risques de dissémination de substances radioactives sont examinés au chapitre 7.1.2 du présent rapport.

7.1.1.2 Exposition externe

L'Andra indique [39] que les risques d'exposition externe, en fonctionnement normal et en situations incidentelle et accidentelle, sont liés aux termes sources contenus dans les colis de déchets. Pour toutes les familles de colis de déchets, le DED ambiant à 1 m est majoritairement dû aux photons et, selon le type de colis, aux neutrons également. En outre, l'IRSN note que l'ambiance radiologique attendue à proximité d'une grande partie des colis primaire est très élevée, et comprise entre plusieurs dizaines de mSv/h et plus de 127 Sv/h, ce qui est incompatible avec la présence de personnel. Néanmoins, bien que l'Andra ne retienne pas comme fonction du conteneur de stockage la limitation du débit de dose, celui-ci atténue considérablement le DED à 1 m. L'Andra a indiqué au cours de l'instruction que les critères d'acceptation des colis sur Cigéo, en termes de DED, seront définis et présentés dans le cadre de la DAC. En outre, elle a précisé qu'en cas d'écart avec ces critères constaté à la réception des colis, il est envisagé que ceux-ci puissent, en fonction du niveau d'écart (nombre de colis et « gravité »), soit être retournés à l'expéditeur, soit faire l'objet d'une dérogation, en concertation avec le producteur de déchets concerné, sans toutefois préciser quantitativement ces niveaux. Une zone tampon est d'ores et déjà prévue dans l'installation pour accueillir ces colis, en attente du traitement de l'écart. L'Andra a également indiqué qu'au stade de la conception de l'installation, les caractéristiques radiologiques maximales des colis (DED, activités, radionucléides) actuellement connues servent de données d'entrée des études de dimensionnement de l'installation, notamment pour ce qui concerne les protections radiologiques (cf. *infra*). L'Andra retient ainsi, selon la zone dimensionnée (locaux des installations de surface accueillant les colis primaires, locaux et équipements des

⁵⁶ Le seuil d'action de 400 Bq/m³ est la valeur d'activité volumique à partir de laquelle des actions techniques doivent être mises en œuvre pour réduire l'exposition des travailleurs aussi bas que raisonnablement possible (arrêté du 7 août 2008 [133] et décision n°2008-DC-0110 de l'ASN homologuée par arrêté du 8 décembre 2008 [233])

installations accueillant des colis de stockage, hottes MAVL et HA), la ou les familles de colis pour lesquelles les caractéristiques sont à considérer pour le dimensionnement des protections radiologiques.

L'IRSN note que la justification des critères de DED maximaux d'acceptation des colis de déchets sur Cigéo sera apportée par l'Andra dans le dossier de DAC (cf. chapitre 3.1.6 du présent rapport). **A ce stade du dossier, l'IRSN ne relève pas de difficultés majeures, en particulier au regard du REX important en la matière, quant au dimensionnement des installations vis-à-vis des risques d'exposition externe à même d'atteindre les objectifs de radioprotection que l'Andra se fixe.**

7.1.1.3 Démarche d'optimisation

Dans la zone nucléaire, l'Andra distingue [39] deux types de postes de travail (« permanent » et « occasionnel ») pour lesquels des objectifs de dimensionnement des protections radiologiques, en termes de DED, sont définis selon le temps de présence du personnel, à savoir 3,5 µSv/h pour les postes de travail permanent (1 500 heures de présence annuelle) et 25 µSv/h pour les postes de travail occasionnel (de 1 heure à 300 heures de présence annuelle). L'Andra a indiqué au cours de l'instruction que les postes de travail permanent sont essentiellement localisés en salle de conduite et que les postes de travail occasionnel sont situés dans des locaux susceptibles d'accueillir des opérations de maintenance (principalement dans les zones arrière des cellules blindées dans l'installation de surface et dans la cellule de manutention des alvéoles MAVL). Par exemple, le remplissage de l'alvéole MAVL est réalisé à l'aide d'un pont stockeur ou d'un chariot stockeur et aucun personnel n'est autorisé dans la partie utile de l'alvéole. Néanmoins, en cas d'opération de maintenance sur le dispositif de transfert, cette opération aura lieu dans la cellule de manutention en amont de l'alvéole. Une séparation physique amovible ayant un rôle de protection radiologique est alors disposée entre l'alvéole de stockage et la cellule de manutention. Cette porte de radioprotection est dimensionnée de façon à ce que le DED à son contact soit inférieur ou égal à 25 µSv/h. **Ceci n'appelle pas de commentaire de la part de l'IRSN au stade du DOS.**

L'Andra indique [39] que les principales dispositions de protection mises en œuvre sur Cigéo vis-à-vis du risque d'exposition externe sont le dimensionnement du génie civil et des équipements (portes et hublots blindées, façades d'accostage, bouchons de radioprotection au niveau des alvéoles HA, blocs de béton de fermeture des alvéoles MAVL, murs de béton mis en place lors des opérations de fermeture...) suivant le principe ALARA, le dimensionnement des hottes pour que l'exposition à 1 m autorise ponctuellement la présence d'opérateurs à proximité en cas d'intervention et la réalisation des opérations de maintenance en l'absence de colis de déchets à proximité. En particulier, concernant les opérations de maintenance sur les filtres THE à l'extraction des alvéoles MAVL, l'Andra a précisé au cours de l'instruction que des locaux spécifiques accueilleront ces filtres afin de favoriser leur maintenance à distance des colis de déchets. Les dispositions prévues seront définies et détaillées dans le cadre de la DAC. **Ceci n'appelle pas de commentaire de la part de l'IRSN au stade du DOS.**

En outre, l'Andra indique [39] que différentes dispositions de prévention lui permettront de s'assurer que les conditions radiologiques dans l'installation sont conformes à celles attendues, notamment les spécifications d'acceptation des colis et les contrôles en entrée de site, l'automatisation de la supervision à distance des opérations de manutention des colis, l'asservissement des accès aux locaux contenant des colis, la séparation des voies de circulation des colis et du personnel, la limitation à la conception des équipements susceptibles de

nécessiter une maintenance dans les zones à forte exposition, le zonage radiologique⁵⁷ et la formation réglementaire et périodique en radioprotection du personnel.

Les dispositions de prévention et de protection du risque d'exposition externe aux rayonnements ionisants présentées par l'Andra en situation normale d'exploitation, incluant les opérations de maintenance, sont satisfaisants dans leur principe.

S'agissant du zonage radiologique, l'Andra le définit [39] pour les locaux des différentes installations de Cigéo (surface, liaison surface/fond et souterraine). L'Andra indique que ce zonage ne tient compte que de l'exposition externe étant donné que le risque d'exposition interne lié à la présence de contamination surfacique résiduelle des colis est très faible. L'Andra a précisé au cours de l'instruction que les zones contrôlées « rouge » identifiées pour les cellules, les couloirs et les cellules de manutention sont un zonage intermittent permettant un déclassement de la zone en l'absence de colis. L'IRSN observe que l'Andra ne précise ni le zonage après déclassement ni les dispositions techniques relatives au balisage et à la signalisation permettant d'assurer la continuité du zonage radiologique durant le déclassement. De plus, l'IRSN constate que l'Andra ne présente pas le classement radiologique et l'organisation de la salle de commande du bâtiment EP1.

Aussi l'IRSN estime que l'Andra devra compléter, dans le dossier de DAC, l'organisation de la salle de commande de l'installation EP1 et la justification de son classement radiologique. L'Andra devra préciser les modalités de déclassement des zones « rouges », de signalisation des zones intermittentes et de gestion des accès. Ce point fait l'objet de l'engagement E32-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué que la zone travaux était classée en zone non réglementée au sens de l'arrêté du 15 mai 2006 [134]. A ce titre, les travailleurs qui y évolueront pour les opérations de creusement des galeries et des alvéoles seront des travailleurs considérés comme non exposés aux rayonnements ionisants et ne pourront pas accéder à la zone nucléaire adjacente en situation normale. Ce point est repris dans l'examen des risques liés à la coactivité entre zone nucléaire et zone travaux présenté au chapitre 7.2.7 du présent rapport.

Enfin, pour ce qui concerne les dispositions de protection contre le risque d'exposition interne ou de contamination des locaux, l'Andra envisage [39] la mise en place d'un zonage « déchets » qui permettra de séparer les zones présentant un risque potentiel de contamination de celles classées en zone conventionnelle avec imposition de contrôles de non contamination au niveau des sauts de zone. L'Andra a précisé au cours de l'instruction que l'utilisation, si nécessaire, d'équipements de protection de voies respiratoires pour le personnel effectuant des opérations en cellule potentiellement contaminée ainsi que de tenues ventilées en cas d'incident de contamination étaient envisagée. Ceci n'appelle pas d'observation de la part de l'IRSN au stade du DOS.

7.1.1.4 Adaptabilité de Cigéo aux combustibles usés et aux déchets en réserve

L'Andra considère [48] que le dimensionnement des protections radiologiques aux photons et aux neutrons dans les installations permettrait d'accueillir les déchets en réserve sans difficulté particulière en matière de radioprotection. En effet, elle précise que pour les déchets de graphite du CEA et d'EDF et les déchets des silos 115

⁵⁷ Le zonage radiologique correspond au classement des zones et/ou locaux selon la nature et l'ampleur du risque dû aux rayonnements ionisants

et 130 et des décanteurs 1 et 2 du HADE de La Hague, les activités moyennes par colis de déchets **FAVL** sont inférieures voire très inférieures aux activités maximales retenues comme caractéristique dimensionnante pour les déchets **MAVL** avec le même type de conteneur de stockage. Pour les résines échangeuses d'ions, les activités moyennes sont également inférieures aux activités maximales retenues comme caractéristique dimensionnante pour les déchets **MAVL** avec le même type de conteneur de stockage (à l'exception d'une famille particulière qui présente une activité équivalente due en quasi-totalité à l'américium 241). Pour les sources de détecteurs ioniques, les paratonnerres et les déchets divers de la Défense Nationale, l'Andra indique que le respect des activités moyennes aux spécifications d'acceptation dans **Cigéo** devra être vérifié. L'IRSN n'a pas de remarque sur ces points mais observe que l'Andra ne précise pas le cas des enrobés bitumineux **FAVL** de Marcoule ni celui des déchets **MAVL** et **HA** issus de l'exploitation et du démantèlement d'un éventuel second **EPR**. Ces déchets devront donc être intégrés dans l'étude de l'adaptabilité ainsi que les combustibles issus des réacteurs civils et militaires du **CEA**, ceux de la Défense Nationale et ceux issus du réacteur électrogène EL4 qui ne sont pas pris en compte dans l'étude d'adaptabilité à ce stade (cf. chapitre 3.6.4 relatif à l'inventaire des combustibles usés).

L'Andra indique [47] que les dispositions de protection des personnes vis-à-vis de l'exposition aux rayonnements ionisants retenues pour les colis **HA** sont également applicables aux colis de combustibles usés (mise en place de protection radiologiques, définition d'un zonage radiologique). Elle a précisé au cours de l'instruction que le dimensionnement des protections radiologiques sera effectué afin de respecter des débits de dose semblables à ceux définis dans le **DOS** (3,5 µSv/h pour des postes de travail permanent et 25 µSv/h pour des postes de travail occasionnel, cf. *supra*). L'Andra précise [47] que les épaisseurs des protections radiologiques considérées pour la hotte de transfert « multi-assemblages » pour le transfert des combustibles usés [47] sont dimensionnées pour respecter les valeurs de DED de 2 mSv/h au contact et de 0,1 mSv/h à 1 mètre. L'IRSN considère qu'au stade du **DOS**, les hottes sont destinées à être utilisées de manière similaire à celles des colis **HA** et **MAVL**, pour lesquelles le dimensionnement retient un poste de travail occasionnel à proximité. Aussi, l'IRSN estime que le dimensionnement des protections radiologiques de la hotte de transfert de combustibles usés devrait également respecter le débit de dose maximal retenu pour les postes de travail occasionnel.

Il conviendra donc que l'Andra précise, dans le cadre des études relatives à l'adaptabilité de **Cigéo** au stockage de combustibles usés, la possibilité de dimensionner la hotte de transfert de combustibles usés du type « multi-assemblages » pour garantir le respect des objectifs de DED retenus, ou à défaut des dispositions complémentaires de radioprotection permettant de satisfaire cet objectif.

7.1.1.5 Dispositions de surveillance de l'ambiance radiologique et de contrôle de non contamination

L'Andra [39] indique que les dispositifs de surveillance de l'ambiance radiologique (débit de dose et contamination dans l'air) sont couplés avec des alarmes (visuelle, sonore) permettant de prévenir le personnel d'une situation anormale. De plus, ces dispositifs seront reliés au tableau de contrôle des rayonnements ionisants centralisé dans la salle de commande. Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN au stade du **DOS**.

7.1.1.5.1 Surveillance du niveau de contamination

L'Andra indique [39] que la contamination des locaux, matériels, petits outillages et du personnel fait l'objet de dépistages systématiques après chaque intervention en zone et avant intervention si nécessaire.

Concernant la contamination surfacique des locaux et des équipements, des contrôles et des mesures de contamination surfacique dans les différents locaux et sur les équipements seront effectués périodiquement [39] par le service de radioprotection et serviront à établir une cartographie de la contamination (mesures directes et indirectes par frottis contrôlés à l'aide de sondes « alpha » et/ou « bêta-gamma »). Un local est ainsi considéré contaminé dès lors qu'une contamination surfacique ajoutée est détectée (radioactivité artificielle). Une signalisation appropriée sera alors mise en place aux accès et une opération de décontamination sera effectuée pour revenir à la situation initiale définie par le zonage déchets/propreté radiologique (cf. chapitre 7.1.1). **Ceci n'appelle pas d'observation de la part de l'IRSN.**

Concernant la contamination surfacique des objets, des petits matériels et du personnel, le contrôle de contamination surfacique sur les outillages ou les matériels est effectué par le personnel avec des frottis mesurés à l'aide de contaminamètres ou de sondes α ou β . L'Andra indique par ailleurs que certains contrôles radiologiques par frottis pourront se faire dans un sas dédié et que le comptage pourra être réalisé sur un banc de mesure. L'IRSN souligne que la détection de contamination labile sur les objets, les petits outils ou les petits matériels par mesure indirecte à l'aide de frottis ne permet pas toujours un dépistage efficace de la contamination de bas niveau. L'IRSN estime que des moyens complémentaires devraient être envisagés pour réaliser ce type de contrôle, comme la mise en place de mesures directes. Il conviendra que l'Andra précise, dans le cadre de la DAC, les contrôles de non contamination surfacique retenus pour les objets et petits matériels et justifie, le cas échéant, l'absence de moyens de contrôle direct de la contamination (par exemple des contrôleurs de petits objets « blindés »).

Les sorties du personnel des zones contrôlées vers les zones surveillées se font *via* un contrôleur de contamination « mains-pieds » et/ou *via* un contaminamètre. En sortie de zone à déchets nucléaires (*i.e.* zone à risque de contamination), des dispositifs de type contrôleur mains-pieds ou de type polyradiamètre avec sonde seront mis en place afin de vérifier l'absence de contamination corporelle des intervenants. L'Andra a précisé au cours de l'instruction que les zones arrières seraient équipées de polyradiamètres et de sondes α et β pour le contrôle de zone « process » (maintenance en arrêt d'exploitation) ainsi que pour le contrôle des colis de déchets technologiques qui y seraient produits. Ces contrôles seront effectués en limite de zone contrôlée, dans des locaux « sas » entre la zone arrière et la zone surveillée, où circule le personnel. Par ailleurs, les sorties du personnel des zones réglementées se font *via* un portique de contrôle avant leur entrée dans le vestiaire chaud. En cas de suspicion ou de détection d'une contamination d'un opérateur, il est prévu que le personnel fasse immédiatement appel au service de radioprotection de Cigéo. **Ceci n'appelle pas d'observation de la part de l'IRSN.**

La surveillance de la contamination atmosphérique dans les locaux des installations de surface et souterraine est analysée au chapitre 7.1.2 relatif aux risques de dissémination.

7.1.1.5.2 Surveillance du niveau d'irradiation

L'Andra indique [39] que les cellules blindées et les cellules de manutention des alvéoles MAVL feront l'objet d'une surveillance collective de l'irradiation avec des sondes gamma à très haut flux. Elle a précisé au cours de l'instruction que la surveillance de l'irradiation sera également réalisée dans les locaux de l'installation où transitent des colis de déchets (hall de déchargement des emballages, cellules blindées des installations de surface,

descenderies des colis...) et dans les locaux adjacents dans lesquels des postes de travail sont identifiés (zones avant et arrière des cellules blindées, zone d'accostage des hottes, galeries et cellules de manutention...) et que les études réalisées en vue de la DAC préciseront l'implantation des moyens de surveillance ; celles-ci préciseront également les moyens de surveillance mis en œuvre concernant le risque d'exposition externe aux neutrons. Ceci n'appelle pas de remarque à ce stade mais l'IRSN rappelle que l'implantation des moyens de surveillance de l'irradiation et les seuils d'alarme associés devront être définis en cohérence avec les postes de travail permanent et occasionnel identifiés ainsi que les niveaux d'exposition externe attendus à ces postes.

Concernant les moyens de surveillance radiologique envisagés dans la zone « travaux » située en zone non réglementée dans la partie souterraine, l'Andra a indiqué en instruction que cette zone fera « l'objet de surveillance radiologique réglementaire de manière similaire aux installations non nucléaires existantes sur des sites nucléaires ». La méthode retenue par l'Andra pour s'assurer du respect de son objectif de classement en zone non réglementée de la zone « travaux », tant d'un point de vue de l'irradiation que de la contamination, n'est toutefois pas précisé. Ceci devra être présenté dans le dossier de DAC.

7.1.2 DISSEMINATION DE SUBSTANCES RADIOACTIVES

Au stade du DOS, comme dans le dossier « Maîtrise des risques en exploitation », l'Andra retient [39] la mise en place de systèmes de confinement entre les substances radioactives et l'environnement, pour les situations normales et le maintien d'au moins un de ces systèmes en situations incidentelles et accidentelles. Ces systèmes de confinement sont composés d'un ensemble de barrières physiques (colis primaires, conteneurs de stockage, mur des locaux, cellules...) et/ou de barrières dynamiques (ventilation avec filtration très haute efficacité (THE), mise en dépression...) destinés à confiner les substances radioactives.

7.1.2.1 Premier système de confinement

L'Andra indique [39] que les déchets seront reçus sur Cigéo sous forme de colis primaires. Il est à noter que l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que la réception de colis primaires déjà placés dans un conteneur de stockage par les producteurs n'était plus envisagée.

Comme indiqué au chapitre 2.8.1 du présent rapport, l'Andra précise [39] les fonctions de sûreté attribuées aux colis primaires et aux conteneurs de stockage HA et MAVL (selon la solution de stockage retenue dans ce dernier cas). Ces fonctions de sûreté n'appellent pas de commentaire particulier. L'IRSN note que la fonction « assurer le confinement des substances radioactives non gazeuses à un niveau de performance acceptable vis-à-vis de la conception de l'installation (1^{ère} barrière de confinement) » est portée par les colis primaires pour les colis HA et les colis MAVL stockés. Ceci est en conformité avec la demande 2013 D17 [1] de l'ASN formulée à l'issue de l'examen du dossier « Etudes remises depuis 2009 » portant sur les performances attendues pour la première barrière de confinement statique qui doivent être obtenues en priorité par le colis primaire. La demande peut donc être soldée.

Le premier système de confinement des déchets HA est assuré par le colis primaire avant sa mise en conteneur de stockage (i.e. dans l'installation de surface) puis, après, par le colis primaire et le conteneur de stockage qui constituent les deux barrières de confinement du premier système de confinement. L'Andra précise que les sollicitations de type thermique ou mécanique des conteneurs de stockage HA pendant la phase d'exploitation ainsi que celles liées aux situations accidentelles de types chute ou incendie sont couvertes par la robustesse du

conteneur, du fait de son épaisseur retenue pour répondre aux sollicitations chimiques après fermeture (cf. chapitre 5.2.2 relatif au pré-dimensionnement des conteneurs de stockage HA). L'Andra ajoute que le programme d'études et de qualification en cours vérifiera, d'ici à la DAC, que la conception des colis de stockage HA permettra effectivement de résister aux différentes agressions pendant la phase d'exploitation. L'IRSN observe que l'Andra fournit déjà un certain nombre d'éléments quant aux choix de conception des conteneurs de stockage HA devant permettre de garantir les performances attendues au regard des fonctions de sûreté qui leur sont attribuées pendant la phase d'exploitation, **ce qui est satisfaisant.**

Pour les déchets MAVL, l'Andra indique [39] que, avant sa mise en conteneur de stockage, le premier système de confinement est assuré par le colis primaire seul. Après la mise en conteneur du colis primaire, le premier système de confinement est assuré par le colis de stockage. Il est à noter que, comme dans le dossier « Maîtrise des risques en exploitation », l'Andra envisage le stockage direct de certains colis primaires (cf. chapitre 2.3.2). A cet égard, l'IRSN rappelle que l'Andra s'est engagée, à l'issue de l'instruction du dossier « Maîtrise des risques en exploitation » à démontrer, à l'échéance de la DAC, que les performances de confinement atteintes par ces colis primaires étaient équivalentes à celles du système formé par le colis primaire et son conteneur de stockage (engagement 2014 E8.3 [1]).

Pour ce qui concerne la performance des conteneurs de stockage MAVL vis-à-vis des agressions qu'ils pourraient subir, l'Andra a indiqué durant l'instruction qu'un programme de qualification était en cours. Ainsi, tous les types de conteneurs de stockage auront fait l'objet d'essais de résistance à la chute, d'une hauteur de 2,3 m d'ici la DAC, qu'un prototype de conteneur de type CS4 a fait l'objet d'essais de tenue au feu et que les essais de tenue au feu réalisés sur un conteneur de type CS3 étaient représentatifs des conteneurs de type CS1, CS2 et CS5. En outre, des essais qualitatifs de chute avec de la poudre libre dans des conteneurs de stockage ont été réalisés pour tester les performances, sans mettre en évidence de perte de confinement de ces conteneurs. L'IRSN remarque toutefois d'une part que la formulation précise des conteneurs de stockage en béton n'est pas communiquée et d'autre part que les conteneurs de stockage en acier MAVL (CS6 et CS7) sont peu décrits.

L'IRSN considère que le programme de qualification des conteneurs MAVL, qui doit se poursuivre d'ici la DAC, couvre bien les risques inhérents à la phase d'exploitation **et est donc pertinent sur ses principes.**

S'agissant plus particulièrement du programme des essais de démonstrateurs, qui fait partie du programme de qualification, l'IRSN estime toutefois qu'il conviendrait que l'Andra, d'une part précise le programme prévu pour les CS1 et CS5, d'autre part justifie, dans le cas d'essais ne couvrant pas l'ensemble des conteneurs de stockage, le caractère représentatif de ceux sélectionnés.

De manière générale, l'IRSN considère que les conditions et les résultats des caractérisations et des essais permettant de justifier les performances des conteneurs de stockage MAVL pendant la phase d'exploitation et de réversibilité du stockage, devront être présentés dans le dossier en support de la DAC. Ce point fait l'objet de l'engagement E30-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

Compte tenu de ce nouvel engagement, l'IRSN considère que l'engagement 2014 E8.2 [1] relatif à la présentation dans le DOS des fonctions et des performances des conteneurs de stockage peut être soldé. Par ailleurs, comme présenté aux chapitres 2.8.1 et 3.4.1 du présent rapport, l'Andra prévoit dans un alvéole MAVL, pour « pallier un comportement defectueux de certains colis primaires sur la durée d'exploitation de Cigéo », la participation du

conteneur de stockage comme deuxième barrière de confinement (conteneur de stockage « *renforcé vis-à-vis du confinement* », solution n°3), impliquant la mise en place d'un dispositif complémentaire au niveau du colis de stockage (liant de clavage). Elle précise [39] que « *des essais et simulations sont envisagés pour vérifier la pertinence du clavage au stade de l'APD, au regard des résultats obtenus, il pourra être envisagé in fine de ne plus retenir cette solution* ».

A cet égard, l'IRSN estime que les performances de confinement demandées aux colis de stockage et, dans certains cas, au conteneur de stockage sont essentielles pour la sûreté de l'installation souterraine sur toute la durée d'exploitation et de réversibilité. Aussi, l'IRSN estime que, si la solution d'un conteneur de stockage « *renforcé vis-à-vis du confinement* » est toujours retenue dans le dossier de DAC, les essais de qualifications doivent prendre en compte également la possibilité de la présence d'un liant de clavage (ou autre) afin de démontrer que celui-ci n'est pas dégradé suite à une situation incidentelle ou accidentelle. En particulier, l'IRSN estime important que les essais de qualifications prévus sur les conteneurs de stockage (chute, incendie...) permettent de démontrer que les performances de confinement attribuées aux colis de stockage ne sont pas dégradées après un événement.

L'IRSN estime que le programme d'essais de qualification prévu par l'Andra et présenté dans le dossier de DAC devra :

tenir compte des dispositifs complémentaires retenus dans la conception des conteneurs de stockage MAVL « *renforcés vis-à-vis du confinement* » si ceux-ci sont confirmés, permettre de démontrer que l'ensemble des colis de stockage, quelle que soit la solution de stockage retenue (conteneur de stockage « *standard* » ou « *renforcé vis-à-vis du confinement* »), atteignent les performances de confinement visés sur l'ensemble de la phase d'exploitation.

Ce point fait l'objet de l'engagement E33-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

7.1.2.2 Deuxième système de confinement

Dans l'installation de surface, le second système de confinement est assuré par le génie civil des locaux et la ventilation nucléaire associée (cf. *infra*) jusqu'à la mise en conteneur de stockage des colis primaires pour les déchets HA ou jusqu'à la mise en hotte des colis de stockage pour les déchets MAVL.

Pour ce qui concerne spécifiquement les colis de déchets HA, après leur mise en conteneur de stockage, et à l'instar du dossier « Maîtrise des risques en exploitation », l'Andra considère [39] qu'un seul système de confinement est suffisant. Ceci n'appelle pas de remarque.

Hottes de transfert MAVL

Lorsque le colis de stockage MAVL est logé dans la hotte de transfert, le second système de confinement est assuré par ladite hotte. L'Andra indique [39] que ces hottes permettent de préserver le colis de stockage des agressions mécanique ou thermique retenues pour le dimensionnement de l'installation qui pourraient dégrader son confinement. A cet égard, l'Andra retient un taux de fuite de la hotte de $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ afin de respecter les classes de confinement et de ventilation envisagées pour la descenderie, les galeries de liaison et d'accès (cf. *infra*). En outre, l'Andra prévoit la mise en place de deux orifices afin de permettre un balayage de l'atmosphère intérieure de la hotte, pour évacuer l'hydrogène accumulé en cas d'immobilisation prolongée de la hotte pendant son transfert (cf. chapitre 2.2.3). De plus, l'Andra a précisé au cours de l'instruction que des essais de qualification

de la hotte étaient prévus dès que la conception sera figée. Dans un premier temps l'Andra prévoit un programme préliminaire consistant en des essais (chute, choc, séisme et incendie) sur une maquette à l'échelle 1 de la partie avant de la hotte. L'IRSN estime que les orifices présents sur la hotte pour adapter le système de balayage sont susceptibles de constituer des points faibles du confinement. Or, au stade du **DOS**, la conception de la hotte est telle que les orifices se situent en bas, de part et d'autre de la hotte, l'un de ces orifices étant situé au niveau de la porte et l'autre à l'arrière de la hotte. Aussi l'IRSN estime que, compte tenu de la conception actuelle de la hotte, le programme préliminaire prévu par l'Andra consistant en des essais (chute, choc, séisme et incendie) sur une maquette à l'échelle 1 de la partie avant de la hotte n'intègre pas un de ces points faibles du confinement et pourraient donc ne pas être représentatifs des performances de confinement de la hotte en situation accidentelle. L'Andra a indiqué qu'« *en fonction des résultats obtenus [à l'issue de ce programme préliminaire], des essais d'ensemble (produit complet à l'échelle 1) seront menés en vue de la qualification [de la hotte]* » sans toutefois les détailler. A cet égard, l'IRSN estime que le programme d'essais de qualification (programme préliminaire et essais d'ensemble) a pour vocation de s'assurer des performances de confinement de la hotte, en situations normale et accidentelle. **Il conviendra donc que l'Andra s'assure que ce programme intègre bien tous les points faibles du confinement (incluant les deux orifices prévus pour la mise en œuvre du balayage interne), notamment pour estimer le taux de fuite global de celle-ci. Ce point est repris ci-après.**

7.1.2.3 Confinement dynamique

Installation de surface

Au stade du **DOS**, l'Andra retient [39] un classement des locaux en fonction du risque de contamination, conformément à la norme ISO 17873. Elle indique que les réseaux de ventilation sont constitués de deux ventilateurs au soufflage et de deux ventilateurs à l'extraction et qu'en cas de perte de l'alimentation électrique ou d'un ventilateur, le procédé sera arrêté et l'installation mise à l'état sûr. Elle précise que le besoin de redondance sur le soufflage et l'extraction pour les réseaux C3-IIB et C4**-IIIA sera étudié d'ici la **DAC**. **Ces principes de dimensionnement du confinement dynamique des locaux de l'installation de surface n'appellent pas de remarque au stade du **DOS**.**

Installation souterraine et liaisons surface-fond

L'Andra retient [39], comme dans le « Dossier maîtrise des risques en exploitation », une ventilation de type C1-I pour l'ensemble des liaisons surface-fond, la **ZSL** et les galeries d'accès, de liaison et de retour d'air, ainsi qu'une ventilation de type C2-IIA pour les alvéoles **MAVL** (cellule de manutention et partie utile de l'alvéole).

Comme indiqué précédemment, le second système de confinement dans la descenderie, la **ZSL** et les galeries d'accès et de liaison est constitué par les hottes de transfert. L'IRSN observe que, compte tenu de l'absence de filtration avant rejet dans la descenderie, la **ZSL**, les galeries de liaison et les galeries d'accès, la hotte constitue le dernier système de confinement avant rejet vers l'environnement. Aussi, l'IRSN estime que la conception de la hotte, avec ses singularités et le taux de fuite qui en découle, doit satisfaire des exigences fortes de confinement statique permettant de respecter le classement en famille C1-I précité, en particulier en situation accidentelle (cf. chapitre 7.2.3 relatif aux opérations de manutention). A cet égard, l'IRSN rappelle que la démonstration du respect d'une classe de ventilation de type C1-I de la descenderie, de la **ZSL** et des galeries de liaison et d'accès doit prendre en compte des volumes restreints (et non pas le volume total de chacun de ces ouvrages) pour appréhender

la contamination atmosphérique en situation incidentelle ou accidentelle et juger ainsi de la pertinence de traiter l'air avant rejet dans l'environnement.

Aussi, l'IRSN considère que, dans le dossier de DAC, l'Andra devra justifier que la conception de la hotte, prenant en compte ses singularités et son taux de fuite en situations incidentelle et accidentelle, permet de limiter le relâchement d'activité estimé dans un volume restreint, à un niveau compatible avec la classe de ventilation de type C1-I retenue pour les descenderies, la ZSL et les galeries de liaison et d'accès aux alvéoles. Ce point fait l'objet de l'engagement E34-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

Au niveau des alvéoles MAVL, l'Andra indique [39] que la façade d'accostage entre la galerie d'accès et l'alvéole MAVL (cf. description au chapitre 2.6.3 du présent rapport) a pour fonction de maintenir l'étanchéité statique et qu'elle supporte, en partie haute, les passages pour la ventilation de l'alvéole. En outre, un sas situé sur le côté de cette façade d'accostage permet de faire circuler le personnel et le matériel. L'Andra précise que lors de l'accostage d'une hotte à la cellule de manutention, le confinement est réalisé entre la porte de la façade d'accostage et la porte des hottes par des joints gonflables, mais ne détaille pas l'ensemble des dispositions mises en place pour assurer le confinement entre la cellule de manutention de l'alvéole MAVL et la galerie d'accès, notamment au niveau du sas de circulation du personnel et du matériel et au niveau des passages pour la ventilation de l'alvéole, qui pourraient ainsi constituer des points faibles du confinement de l'alvéole MAVL. Aussi, l'IRSN estime qu'il conviendra que l'Andra présente, dans le dossier de DAC, les dispositions prises pour assurer le confinement au niveau de la façade d'accostage entre la galerie d'accès et la cellule de manutention de l'alvéole MAVL dans toutes les configurations (hotte accostée ou non, passage de personnel ou de matériel...) et dans toutes les situations de fonctionnement (normale, incidentelle et accidentelle) et ce, pour tous les éléments constitutifs de cette façade (porte d'accostage, passages pour la ventilation, sas de circulation...). Ceci fait l'objet de de l'engagement E41-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017 présenté au chapitre 7.2.1.6 relatif à la conduite de la ventilation en situation d'incendie.

Par ailleurs, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction qu'afin de tenir compte du déploiement graduel de l'installation souterraine, le nombre de ventilateurs associés aux systèmes de ventilation de l'installation souterraine dépend de la chronologie de déploiement et de fermeture. Elle a précisé que le nombre de ventilateurs mis en place évoluera en fonction (i) des besoins aérauliques identifiés pour chaque phase, (ii) des exigences en matière de sûreté (comme la redondance) et (iii) de l'optimisation de la consommation des ventilateurs en fonction de la chronique de déploiement. L'IRSN considère que ces éléments restent trop succincts pour solder l'engagement 2010 E4.2 [1] relatif à la présentation, au stade du DOS, des principes de pilotage de la ventilation et des dispositifs prévus pour ajuster les paramètres de ventilation et équilibrer le réseau dans toutes les situations de la phase d'exploitation du stockage, incluant les transitoires liés à son déploiement. A cet égard, l'IRSN souligne que l'inertie des systèmes de ventilation dans l'installation souterraine pourrait entraîner un rééquilibrage du réseau lent lors de l'ajout de quartiers depuis la zone travaux vers la zone nucléaire et pourrait ainsi perturber les cascades de dépression en place dans la zone nucléaire. Les éléments de démonstration de la capacité des systèmes de ventilation de l'installation souterraine à intégrer les besoins aérauliques, les principes de pilotage ainsi que les dispositifs mis en place devront nécessairement être apportés pour la DAC, en particulier pour ce qui concerne les phases transitoires liées au déploiement de Cigéo et les phases de remplissage et de fermeture des alvéoles.

Hypothèses génériques pour le dimensionnement de la ventilation des installations

L'Andra a précisé, dans le DOS [39] et au cours de l'instruction, les hypothèses génériques qu'elle retient pour le dimensionnement de la ventilation. Elle présente les coefficients de remise en suspension de substances radioactives en cas de chute de colis primaires retenus dans les scénarios accidentels de dimensionnement. Les coefficients de remise en suspension sont décomposés en :

- un facteur de remise en suspension caractérisant la fraction d'activité mise en suspension en l'absence d'une quelconque matrice d'immobilisation, ce facteur étant pris égal à 10^{-3} quel que soit le déchet considéré. L'IRSN note que cette valeur correspond au facteur de remise en suspension habituellement retenu par les exploitants dans le cas de la chute de poudres dans les installations nucléaires,
- un facteur de rétention⁵⁸ qui varie de 1 à 10^{-2} , en fonction de la matrice du colis primaire considérée (acier, béton, sans matrice...),
- un facteur de rétention qui varie de 10^{-1} à 10^{-2} , en fonction de la nature du conteneur primaire (acier, béton...).

L'Andra retient également un facteur de rétention de 10^{-2} en cas de chute d'un conteneur de stockage d'une hauteur inférieure à 2,3 m. A cet égard, comme indiqué précédemment, l'Andra a précisé durant l'instruction que tous les types de conteneurs de stockage auront fait l'objet d'essais de résistance à la chute, d'une hauteur de 2,3 m et que des essais qualitatifs de chute avec de la poudre libre dans des conteneurs de stockage avaient été réalisés pour tester les performances de ces conteneurs. **L'IRSN considère que ceci est satisfaisant à ce stade et estime que les essais de chute avec et sans poudre libre permettront de confirmer le coefficient de rétention à retenir dans cette situation.**

Pour ce qui concerne les volumes à prendre en compte dans les calculs de remise en suspension de substances radioactives, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que, dans les locaux où les colis sont manutentionnés (en dehors du transfert en hotte), tout le volume du local était retenu pour le dimensionnement de la ventilation, à l'exception des alvéoles de stockage MAVL et de la cellule de déchargement des emballages de transport pour lesquels, selon les scénarios, le sous-volume du local est retenu, celui-ci étant inférieur au volume aéraulique (par exemple uniquement le volume de la cellule de manutention au regard du volume de l'alvéole dans son entièreté). De plus, l'Andra prévoit [98] la prise en compte de volumes compris entre deux recoupes pour la descenderie, les galeries de liaison et les galeries d'accès. **Compte tenu du fait qu'en situation incidentelle ou accidentelle, la contamination ne se dilue pas de manière homogène instantanément dans un très grand volume de local, l'IRSN appelle l'attention sur l'importance de prendre en compte des volumes d'air restreints et en tout état de cause cohérents avec les scénarios incidentels et accidentels retenus, eu égard aux dimensions inhabituelles de l'installation souterraine.**

⁵⁸ L'Andra retient, pour les colis de déchets dont le conditionnement n'est pas encore défini à ce stade, des facteurs de rétention maximaux correspondant à l'absence de matrice d'immobilisation.

7.1.2.4 Dispositions de surveillance du confinement

Surveillance du premier système de confinement

L'Andra indique [39] que les colis primaires et de stockage font l'objet de contrôles tout au long de la chaîne de procédés dans l'installation de surface, de la réception jusqu'à la mise en hotte. En cas de détection de non-conformité, les colis font l'objet d'une analyse conduisant à la mise en place d'actions correctrices. **L'IRSN rappelle que les actions à mettre en œuvre à la suite de la détection d'un colis en écart devront être présentées dans le dossier de DAC en amont de l'élaboration de procédures pour la mise en service des installations.**

Dans les alvéoles MAVL, l'Andra retient, comme dans le « Dossier Maîtrise des risques en exploitation », une surveillance de l'alvéole dans son ensemble, réalisée par le biais d'un dispositif en sortie de chaque alvéole de stockage. L'Andra a précisé, au cours de l'instruction, que ce dispositif serait placé en aval aéraulique du filtre THE. L'Andra considère que les contrôles réalisés tout au long de la chaîne de procédés dans l'installation de surface permettent de garantir une détection suffisamment précoce d'une défaillance du premier système de confinement et ainsi d'éviter une perte de confinement pendant la période de réversibilité. Toutefois, l'Andra a indiqué lors de l'instruction qu'en cas de détection d'une contamination atmosphérique en sortie d'alvéole MAVL, celle-ci ne permettrait pas de conclure sur le ou les colis qui en seraient à l'origine. Cette investigation relèverait alors d'une gestion « post-accidentelle ». A cet égard, elle a précisé qu'un diagnostic serait réalisé à partir de la connaissance de la nature de la contamination et de la connaissance de l'état du remplissage de l'alvéole (nature et nombre de colis). Ce diagnostic, accompagné d'une évaluation des conséquences sur la sûreté, permettrait le cas échéant de déterminer les dispositions à mettre en place.

De manière générale, l'IRSN considère qu'une surveillance globale de l'air de l'alvéole ne permettra pas nécessairement de détecter une contamination résultant d'une dégradation des colis dans l'alvéole, compte tenu du volume important de l'alvéole qui contribue largement à la dilution de cette contamination. De plus, l'IRSN souligne que le positionnement du dispositif en aval du filtre THE entraîne un retard de la détection de la contamination d'autant plus important que le filtre THE retient par conception la majeure partie des aérosols. A cet égard, le retour d'expérience a montré que la surveillance de la contamination, *via* une balise placée à l'extraction, n'a pas permis de détecter la dégradation de plusieurs colis primaires entreposés. Aussi, l'IRSN émet des réserves quant à la représentativité d'une mesure de la contamination atmosphérique dans ces conditions. En outre, l'IRSN rappelle que l'application du principe de défense en profondeur conduit à postuler la défaillance d'un ou plusieurs colis de stockage dans les alvéoles pendant l'exploitation de l'installation et que la surveillance alors mise en place doit permettre de détecter une telle défaillance. De plus, l'IRSN estimait déjà à l'issue de l'examen du dossier « Maîtrise des risques en exploitation » qu'un relâchement de certaines dispositions de sûreté ne pouvait être exclu sur la durée séculaire d'exploitation et de réversibilité de Cigéo. A cet égard, le retour d'expérience d'installations similaires (notamment le WIPP) a montré que malgré des dispositions de contrôle des colis, certains d'entre eux pouvaient être stockés sans qu'une anomalie existante ne soit identifiée. Ainsi, l'IRSN estime que la surveillance des alvéoles MAVL revêt une importance toute particulière parmi les dispositions de sûreté retenues pour Cigéo et considère que les dispositifs de surveillance de la contamination en alvéole MAVL doivent permettre de détecter une contamination atmosphérique en cohérence avec le domaine de fonctionnement, c'est-à-dire être capables d'identifier la perte des performances requises de confinement d'un colis de stockage.

Aussi, l'IRSN estime que l'Andra devra présenter, dans le dossier de DAC, les dispositifs de surveillance de la contamination et les performances qui leur seront assignées, et justifiera la faisabilité technique des dispositions retenues afin de détecter une contamination atmosphérique dans l'alvéole MAVL, en cohérence avec le domaine de fonctionnement. Ce point fait l'objet de l'engagement E35-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

En outre, l'IRSN considère qu'en cas de détection d'une telle contamination, les dispositions d'investigation doivent être anticipées et présentées pour la DAC. L'Andra devra également présenter, à cette échéance, les dispositions de limitation des conséquences et de gestion post-accidentelle suite à une détection de contamination dans un alvéole MAVL. Ceci est examiné au chapitre 7.2.4 du présent rapport.

La surveillance du premier système de confinement en alvéole HA est examinée sous l'angle de la corrosion des conteneurs de stockage au chapitre 5.2.1 relatif à l'évolution des aciers et sous l'angle de la récupérabilité au chapitre 7.2.4 du présent rapport. Ils font l'objet des engagements E16-2017 et E47-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

Surveillance du second système de confinement

L'Andra prévoit [39], en phase d'exploitation, le suivi des principaux paramètres de la ventilation (la dépression des locaux, le respect des cascades de dépression ou les débits d'air...), le suivi de l'ambiance des locaux et le contrôle périodique de l'efficacité des filtres THE. **L'IRSN note que les principes de surveillance de la ventilation sont similaires à ceux mis en œuvre dans les installations nucléaires.**

L'Andra prévoit en outre la surveillance du confinement de la hotte MAVL (contrôles de la pression inter-joint, de la contamination volumique interne et de la contamination surfacique). En particulier, avant et pendant l'accostage de la hotte MAVL à la façade de l'alvéole, l'Andra prévoit la surveillance de la pression dans les joints gonflables et des dépressions entre l'alvéole et la galerie d'accès. **Ceci n'appelle pas de remarque de principe à ce stade.**

Enfin, l'Andra indique [39] que la contamination atmosphérique ambiante sera surveillée de façon permanente dans l'ensemble des installations de surface et souterraine. S'agissant plus particulièrement des locaux de l'installation souterraine, la surveillance de la contamination atmosphérique sera assurée par (i) des balises fixes (surveillance en temps réel) dans les locaux à risque de contamination en situation incidentelle ou accidentelle par prélèvements dans ces locaux ou dans les gaines d'extraction de la ventilation afin d'obtenir une surveillance d'ensemble des locaux possédant des volumes importants mais sans poste de travail particulier (ensemble des locaux où circulent et stationnent des colis de stockage) et (ii) des appareils de prélèvement de poussières atmosphériques (APA - surveillance en différé) dans les cellules de manutention et les locaux de filtration « dernier niveau de filtration » (DNF) des alvéoles MAVL. **L'IRSN rappelle que les moyens de mesure de la contamination atmosphérique dans les installations de surface et souterraine, ainsi que la justification de la réalisation des mesures en temps réel ou en différé et les seuils d'alarme retenus devront être présentés dans le dossier de DAC.**

7.1.3 CRITICITE

7.1.3.1 Installations de surface, liaisons surface-fond et installation souterraine

L'Andra a poursuivi les études de sûreté-criticité engagées dès le « Dossier 2009 » pour ce qui concerne la phase d'exploitation du stockage et l'établissement de critères d'admissibilité des colis, **ce qui répond à l'engagement 2011 R10 [1]**.

L'Andra indique [39] que les dispositions générales relatives à la maîtrise des risques de criticité dans Cigéo sont définies dans le respect de l'arrêté du 20 novembre 2014 portant homologation de la décision n°2014-DC-0462 de l'ASN du 7 octobre 2014. L'Andra précise que Cigéo fera l'objet, dans le dossier de DAC, d'une analyse détaillée permettant d'établir la maîtrise des risques de criticité en situations normale, incidentelle et accidentelle compte tenu des procédés mis en œuvre.

L'Andra ne prévoit pas d'installer de système de détection d'accident de criticité compte tenu notamment de la nature des matières en présence, et en particulier des types de conditionnement de la matière fissile retenus (matrice de blocage ou galettes compactées au niveau des colis primaires et robustesse des colis de stockage), empêchant le regroupement de cette dernière. Durant l'instruction, elle a indiqué qu'« *aucun cumul d'anomalies envisageables susceptible de remettre en cause la maîtrise du risque de criticité est identifié* ». L'IRSN estime que l'absence d'implantation d'un système de détection dédié au risque de criticité est acceptable. Il considère toutefois qu'il conviendrait que l'Andra mène pour la DAC, conformément aux principes formulés dans la décision ASN précitée, une réflexion quant aux moyens qui seraient disponibles dans l'installation pour détecter toute anomalie susceptible de remettre en cause la sûreté-criticité et vérifie que les moyens existants permettraient de statuer sur l'absence de surexposition liée à un hypothétique accident de criticité qui résulterait d'un nombre élevé de défaillances, en y associant une procédure adaptée. A cet égard, l'IRSN relève que l'Andra prévoit, pour la DAC, de préciser les moyens de surveillance du niveau d'irradiation mis en œuvre concernant le risque d'exposition externe aux neutrons (cf. chapitre 7.2.1.1.5.2 du présent rapport). Ces moyens de surveillance pourraient être utilisés pour confirmer l'absence d'occurrence d'un accident de criticité en cas de survenue d'anomalies susceptibles de remettre en cause la sûreté-criticité.

Aussi, l'IRSN considère que l'Andra devra étudier, dans le dossier de DAC, les moyens disponibles pour détecter en phase d'exploitation toute anomalie susceptible de remettre en cause la sûreté-criticité et vérifier que les moyens de surveillance existants permettront de statuer, en cas d'anomalie(s), sur l'absence de surexposition liée à un hypothétique accident de criticité en cas de nécessité d'intervention. Ce point fait l'objet de l'engagement E36-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

Milieu fissile de référence

Les matières fissiles présentes à Cigéo sont de type uranium, plutonium et mélange uranium / plutonium, sous les formes physico-chimiques métal (U, Pu, U+Pu) ou oxyde (UO₂, PuO₂, (U+Pu)O₂).

Au stade du DOS, pour justifier de la sous-criticité des installations, l'Andra retient [39] comme milieu fissile de référence un mélange homogène ²³⁹Pu_{métal} - CH₂. Elle indique que « *la prise en compte d'un milieu à 100 % de ²³⁹Pu permet de couvrir toutes les isotopies du plutonium susceptibles d'être rencontrées, ainsi que la présence de l'isotope ²³⁵U* ». L'Andra a également précisé, au cours de l'instruction, qu'à ce stade, « *aucun colis primaire à recevoir sur Cigéo ne contient exclusivement d'isotopes fissiles isolés de plutonium (²⁴¹Pu) ou d'actinides mineurs* ».

provenant d'opérations de séparation isotopique ». L'IRSN rappelle que le caractère pénalisant du ^{239}Pu par rapport à ^{235}U n'est pas formellement acquis sur toute la plage de rapport de modération et dépend du mode de contrôle de la criticité considéré. **Compte tenu des dimensions des colis et de la masse maximale de matière fissile, l'IRSN considère que le milieu fissile de référence retenu par l'exploitant est satisfaisant à ce stade. L'Andra devrait toutefois étayer le caractère enveloppe de ce milieu fissile pour la DAC.**

Mode de contrôle

Au stade du **DOS**, l'Andra retient [39], comme mode de contrôle, la masse par colis associée à la géométrie des colis et/ou, le cas échéant, la géométrie de la hotte, des entreposages tampons et des alvéoles de stockage [100].

Pour justifier que les masses de matières fissiles présentes dans les conteneurs réceptionnés dans l'installation respectent les limites fixées dans l'installation, l'Andra indique [39] que « *le processus d'acceptabilité permettra de s'assurer sur la base des déclarations et justifications des producteurs que les colis pris en charge respectent les spécifications d'acceptation sur Cigéo* » et que « *la prise en charge d'un nouveau colis est subordonnée au respect de la limite de masse autorisée* ». Durant l'instruction, l'Andra a précisé que des accords « *Andra/producteurs* » seront établis et permettront de « *s'assurer du respect des exigences indiquées dans les spécifications d'acceptation pour Cigéo en particulier celles concernant la sûreté-criticité* ».

L'IRSN considère que les accords « *Andra/producteurs* » doivent préciser les dispositions retenues par le producteur pour garantir les exigences relatives à la sûreté-criticité spécifiées dans les spécifications d'acceptation des colis dans **Cigéo** et, en particulier, le respect des limites de la masse de matières fissiles (méthodes d'évaluation, fiabilité des mesures, estimation des incertitudes, double contrôle de la masse de matières fissiles par conteneur...). Ce point fait l'objet de l'engagement **E36-2017** de la lettre Andra **DG/17-0097** du **25 avril 2017**, rappelée en **Annexe A3** du présent rapport, et fera l'objet d'une attention particulière de la part de l'IRSN lors de l'instruction du dossier de **DAC**.

Critères d'admissibilité et qualification des codes de calcul

Au stade du **DOS**, l'Andra retient [39], comme critères d'admissibilité, des valeurs des facteurs de multiplication effectifs (k_{eff}), toutes incertitudes de calcul comprises, inférieures à 1 avec une marge suffisante selon elle. Ainsi, elle retient un critère d'admissibilité de 0,95 en situations de fonctionnement normal et dégradé et de 0,97 en situations incidentelle et accidentelle. L'Andra a précisé au cours de l'instruction les codes de calcul utilisés pour les configurations retenues, à savoir les codes **TRIPOLI-4.3.2** du formulaire de calcul **CRISTAL** et **MCNPX 2.6.0** sans toutefois présenter leur qualification vis-à-vis de ces configurations. L'IRSN note qu'un bon accord entre les calculs et les expériences critiques est généralement constaté avec le formulaire de calcul **CRISTAL** pour des milieux plutonifères modérés, néanmoins cela ne préjuge pas d'un éventuel biais imputable aux matériaux de structure des colis, des alvéoles de stockage et/ou de la matrice des déchets qui sont retenus dans les configurations de calcul.

Aussi, l'IRSN estime qu'il conviendrait que l'Andra présente, dans le dossier de **DAC**, une analyse de la qualification des codes de calculs utilisés pour traiter les configurations retenues notamment en tenant compte des matériaux de structure modélisés dans les évaluations des risques de criticité.

Maîtrise des risques de criticité dans l'installation

L'Andra retient [39] une valeur forfaitaire de 200 g de ^{239}Pu par colis primaire. Pour les colis primaires présentant des masses maximales de matière fissiles supérieures à 200 g (colis **EiP** de masse maximale égale à 283 g), l'Andra a

précisé, au cours de l'instruction, calculer une masse équivalente en ^{239}Pu de la masse de matière fissile maximale des colis en retenant un coefficient d'équivalence en masse entre l' ^{235}U et le ^{239}Pu ⁵⁹. L'IRSN note que le caractère enveloppe du coefficient d'équivalence obtenu entre l' ^{235}U et le ^{239}Pu à partir des masses critiques n'est pas toujours acquis pour toute la plage de modération et dépend du mode de contrôle de la criticité considéré. En outre, l'IRSN observe que le coefficient d'équivalence retenu par l'Andra (1 g d' ^{235}U = 0,6 g de ^{239}Pu) a été déterminé, d'une part à partir de la masse critique d'U et non celle d' ^{235}U , d'autre part avec une modération par de l'eau alors que la modération retenue pour le milieu fissile de référence des installations est du CH_2 (cf. *supra*). L'IRSN estime que la sûreté-criticité de ces colis n'est pas susceptible d'être remise en cause par ces constats. Néanmoins, l'IRSN estime que l'Andra devrait apporter, si elle conserve cette approche dans le dossier de DAC, des compléments de justification sur la valeur du coefficient d'équivalence en masse retenu entre l' ^{235}U et le ^{239}Pu pour les colis présentant des masses maximales de matière fissile supérieures à la limite retenue pour du ^{239}Pu dans l'analyse de sûreté-criticité.

La justification de la sous-criticité des installations présentée par l'Andra, pour la mise en stockage et pour le retrait de colis, repose sur la durabilité des colis de stockage et le maintien de la matière fissile dans chacun des logements du colis de stockage en cas de dégradation des colis primaires [100]. A l'égard des opérations de retrait, l'Andra a précisé, au cours de l'instruction, que « l'évaluation du risque [de criticité] est équivalente à celle des opérations de stockage des colis » et que la conception du conteneur de stockage vise « à le rendre suffisamment robuste pour que, même en cas de dégradation des colis primaires qu'il contient, la manutention et le maintien des matières fissiles dans les logements du conteneur soient assurés ». L'IRSN estime qu'il conviendrait que l'Andra précise, pour la DAC, les dispositions de sûreté retenues vis-à-vis du risque de criticité le cas échéant lors des opérations de récupération des colis eu égard à une éventuelle dégradation/endommagement des colis.

En outre, l'Andra a présenté, durant l'instruction, une synthèse des principales hypothèses retenues dans les analyses de sûreté-criticité. L'IRSN note, d'une part que l'Andra considère les dimensions géométriques nominales des colis, d'autre part que les descriptions géométriques des colis considérées dans certaines configurations sont particulièrement détaillées [100]. En effet, l'Andra modélise des éléments tels que les encoches en bas des conteneurs de stockage MAVL destinées à la manutention ou encore les parties supérieures plus larges des logements des colis de stockage alors que ceux-ci n'impactent pas significativement la réactivité. Aussi, l'IRSN estime que l'Andra devrait, d'une part prendre en compte les tolérances de fabrication et les éventuelles incertitudes sur les dimensions géométriques retenues dans les études de sûreté-criticité, d'autre part simplifier ses modèles de calcul pour faciliter l'identification des paramètres géométriques à garantir au titre de la maîtrise des risques de criticité, ces dimensions géométriques devant être celles à garantir lors des contrôles à réception des conteneurs de stockage et durant toute la phase d'exploitation.

Fonctionnement normal

Pour la phase d'exploitation, l'Andra définit des unités de criticité, correspondant à chacune des étapes du procédé de l'installation. Elle analyse le risque de criticité dans les zones de réception et préparation des emballages de

⁵⁹ Ce coefficient d'équivalence est déterminé à partir des masses minimales critiques d' ^{235}U , pour un milieu U métal enrichi à 93,5% en ^{235}U et de ^{239}Pu pour un milieu ^{239}Pu métal, obtenues en considérant la matière fissile modérée par de l'eau et réfléchi par 20 cm d'eau.

transport, les entreposages tampons des colis primaires, les entreposages tampons des colis de stockage, les alvéoles de stockage, et lors des transferts.

L'Andra indique [39] que les conditions d'exploitation rencontrées au niveau de la réception et de la préparation des emballages de transport sont couvertes par l'agrément de transport et le respect de ses exigences. L'IRSN estime pour sa part que les agréments de transport ne constituent pas une démonstration de la sûreté car ils sont délivrés pour une durée limitée et ne permettent pas toujours de justifier des conditions spécifiques liées à l'installation (par exemple les murs en béton, la hauteur de manutention, l'absence du couvercle d'emballage ou des capots de protection dans certaines configurations...). Il est en revanche envisageable de s'appuyer sur les études de criticité citées dans les agréments de transport sous réserve de s'assurer que les hypothèses prises en compte permettent de couvrir les conditions spécifiques liées à l'installation mentionnées ci-avant. **Aussi, il conviendra que l'Andra justifie, dans le dossier de DAC, la sous-criticité des opérations associées aux emballages de transport en s'appuyant sur des études de criticité, éventuellement communes aux dossiers de transport, et en s'assurant du respect des exigences figurant dans ces études.**

Par ailleurs, l'Andra justifie [39] la sous-criticité (i) des zones tampons (entreposage des colis primaires et des colis de stockage dans l'installation de surface, cf. chapitre 2.6.1.1), (ii) des transferts des colis (colis primaires ou de stockage) et (iii) des alvéoles de stockage (HA et MAVL).

Pour ce qui concerne les zones tampon d'entreposage de colis primaires, l'IRSN note que l'Andra ne considère pas de décentrage radial de la matière fissile dans les colis primaires. Or, la prise en compte de ce dernier, conduisant au rapprochement des matières fissiles des colis, peut avoir un impact important sur la réactivité de l'entreposage. **Aussi, il conviendra que l'Andra justifie, dans le dossier de DAC, l'absence de prise en compte d'un décentrage radial de la matière fissile dans la configuration d'entreposage tampon des colis primaires.**

Pour les opérations de transfert des colis primaires et de stockage, l'Andra indique [39] que les colis sont sûrs par conception (cf. paragraphe ci-avant relatif aux modes de contrôle) et que la manutention des colis de stockage dans une hotte fait l'objet de calculs spécifiques considérant la géométrie des colis de stockage et des hottes (prise en compte des réflexions apportées par l'épaisseur importante d'acier de la hotte). **Ceci n'appelle pas de remarque de l'IRSN à ce stade.**

S'agissant enfin des alvéoles de stockage, l'Andra indique [39] que la réactivité dans celles-ci a été évaluée en considérant des alvéoles de longueur infinie, en retenant les configurations les plus réactives. Par exemple, elle retient un décentrage de la matière fissile dans les colis superposés (matières fissiles sous forme de sphères décentrées vers le haut pour le colis du premier niveau et vers le bas pour le colis du second niveau). **Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN, hormis celles présentées ci-avant dans les paragraphes relatifs à la maîtrise des risques de criticité dans l'installation et aux critères d'admissibilité et qualification des codes de calcul.**

Situations incidentelles et accidentelles

Au stade du DOS, l'Andra retient [39] comme scénarios pouvant avoir des conséquences sur la sûreté-criticité :

- la chute d'un colis primaire, d'un colis de stockage ou d'une hotte de transfert (isolé ou sur une zone tampon) lors de leur manutention ou en cas de séisme,
- la modification de l'agencement des colis dans les zones tampon et dans les alvéoles en cas de séisme,

- un incendie provoquant des dommages susceptibles de modifier des propriétés des matériaux et, dans le cas extrême, provoquer une déformation des colis.

L'Andra indique [39] en outre qu'à ce jour, le mode de contrôle par la modération n'étant pas retenu, les conditions de réflexion retenues dans le cadre des évaluations du risque de criticité, couvrent les risques liés à l'inondation. **Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN à ce stade.**

Pour ce qui concerne la chute d'un colis primaire, d'un colis de stockage ou d'une hotte isolée, l'Andra indique [39] que la sûreté-criticité des installations n'est pas remise en cause en raison soit de la quantité limitée de matière fissile pour les colis primaires soit de l'absence de déformation conduisant à une modification significative de la géométrie pour les colis de stockage et les hottes.

S'agissant de la chute d'un colis primaire ou d'un colis de stockage sur une zone tampon, l'Andra indique [39] que « *la constitution des déchets (présence d'une matrice de blocage, galettes compactées...), permet d'exclure un scénario de regroupement de la matière fissile* ». Elle a précisé, au cours de l'instruction, que la chute d'un colis sur un autre dans un entreposage tampon était exclue, les colis de stockage étant manutentionnés par des moyens au sol et les colis primaires étant manutentionnés de manière à interdire le survol d'un colis primaire au-dessus d'un ou plusieurs colis primaires. En outre, elle a indiqué que des zones d'exclusion seraient mises en place au niveau des entreposages tampon de colis primaires afin d'exclure la chute de charge d'objets sur les entreposages tampon (le pont roulant et la chaîne de levage étant par ailleurs dimensionnés au séisme). Il en va de même dans les alvéoles MAVL, où l'Andra considère que la chute d'un colis de stockage sur ceux déjà stockés ne remet pas en cause la démonstration de sûreté-criticité en raison de la faible hauteur de manutention et donc de la limitation des déformations des colis de stockage dans un tel cas. **Ceci est satisfaisant.**

7.1.3.2 Adaptabilité de Cigéo aux déchets en réserve

Pour rappel, une partie des déchets en réserve est constituée de déchets MAVL et HA issus d'un EPR supplémentaire, pour lesquels l'analyse des risques de criticité de Cigéo (cf. *supra*) s'applique.

Pour le cas des déchets FAVL, l'Andra indique [48] que le très faible contenu en matières fissiles de ces déchets rend en pratique la fonction « *maîtriser le risque de criticité en fonctionnement normal, incidentel et accidentel de l'installation* » sans objet pour ces déchets. Elle a précisé, durant l'instruction, que parmi ces déchets, certains contiendront de l'uranium enrichi à moins de 1 % en ^{235}U et une faible teneur en Pu tandis que les autres contiendront une masse faible, inférieure à la masse sûre, en uranium enrichi à plus de 1 % en ^{235}U et en Pu. L'IRSN estime que les analyses de sûreté-criticité réalisées pour les déchets de l'inventaire initial permettent d'avoir confiance quant à l'adaptabilité du stockage Cigéo aux déchets en réserve vis-à-vis des risques de criticité. Toutefois, il conviendra que l'Andra précise, dans le cadre des études relatives à l'adaptabilité de Cigéo au stockage des déchets en réserve, les exigences associées à la maîtrise du risque de criticité pour les déchets FAVL.

7.1.3.3 Adaptabilité de Cigéo aux combustibles usés

L'Andra indique [47] que l'étude de l'adaptabilité de Cigéo pour les combustibles usés a évolué depuis le « Dossier 2005 » pour prendre en compte notamment la nouvelle réglementation, à savoir la décision n°2014-0462 de l'ASN du 7 octobre 2014 relative à la maîtrise du risque de criticité dans les INB.

Milieu fissile de référence

L'Andra retient [47] comme milieux fissiles de référence, en fonctionnement normal, un réseau de crayons à base d'oxyde (UO₂ ou (U,Pu)O₂) gainés et, en situations incidentelle ou accidentelle, un réseau de pastilles non gainées de diamètre variable, l'intégrité des crayons n'étant pas garantie. **Ces milieux fissiles n'appellent pas de remarque.**

Elle précise que lorsque l'étude de sûreté-criticité le nécessite, l'irradiation des assemblages est prise en compte. L'Andra considère, pour prendre en compte l'irradiation des combustibles REP UOX, un profil de combustion uniforme le long de l'assemblage, l'usure du combustible initial, l'apparition du Pu, de l'Am et de certains produits de fission. Elle précise que « *dans un premier temps, et de manière conservatrice, il n'est pas pris en compte les six produits de fission qui ont un effet absorbant (¹⁰³Rh, ¹³³Cs, ¹⁴³Nd, ¹⁴⁹Sm, ¹⁵²Sm, ¹⁵⁵Gd)* ». L'IRSN note que l'Andra considère un temps de refroidissement nul dans ses études alors que cette hypothèse peut ne pas être conservatrice pour les temps de refroidissements courts (non prise en compte notamment de la décroissance du ²³⁹Np, de période égale à 2,5 jours et dont le fils est le ²³⁹Pu qui est un élément fissile). Outre le temps de refroidissement, l'IRSN observe que les principales conditions d'irradiation retenues dans les calculs d'évolution du combustible (température du modérateur, concentration en bore, densité du modérateur, nombre de cycles d'irradiation...) ne sont pas précisées à ce stade. **Aussi, il conviendra que l'Andra justifie, dans le cadre des études relatives à l'adaptabilité de Cigéo au stockage de combustibles usés et, en particulier, dans les études tenant compte de l'irradiation du combustible, les principales conditions d'irradiation retenues dans les calculs d'évolution du combustible au regard de l'origine de ceux-ci, afin de garantir le caractère conservatif de la composition isotopique retenue vis-à-vis du risque de criticité.**

Mode de contrôle

L'Andra retient [47], comme mode de contrôle de la criticité, la géométrie des assemblages, des colis, de l'entreposage ou des alvéoles de stockage, associée éventuellement à la limitation de la modération. La limitation de la masse de matière fissile est retenue en tant que mode de contrôle secondaire. **Le mode de contrôle principal apparaît adapté aux opérations prévues.** S'agissant de la limitation de la modération, ce point est repris ci-dessous dans le paragraphe relatif à la maîtrise des risques de criticité en fonctionnement normal.

Critères d'admissibilité et qualification des codes de calculs

L'Andra indique [47] que les critères d'admissibilité retenus sont identiques à ceux présentés pour les colis HA et MAVL [39]. Elle ne présente pas d'analyse de la qualification des codes de calculs utilisés (modules ORIGEN-ARP et CSA6/KENO-VI, associés à la bibliothèque de sections efficaces ENDF/B-VII.1, du formulaire SCALE version 6.1) qui permette de se positionner sur un éventuel biais de qualification. L'Andra a précisé durant l'instruction que « *des marges très importantes existent vis-à-vis des résultats des calculs présentés [...]. Ces marges ainsi que l'absence de prise en compte des produits de fission garantissent des résultats conservatifs vis-à-vis de la non prise en compte d'un biais de qualification* ». L'IRSN relève que d'une part l'Andra ne quantifie pas, à ce stade, les marges qu'elle considère « *très importantes* » et d'autre part les résultats présentés dans l'analyse se limitent à la configuration d'un assemblage ou d'un colis isolé et que celle-ci est traitée en considérant des milieux à base d'oxydes à sec pour lesquels un manque de qualification des codes de calcul est généralement constaté. **Aussi, l'IRSN estime que, dans le cas d'une demande d'autorisation de stocker les combustibles usés dans Cigéo, il conviendrait que l'Andra présente une analyse de la qualification des codes de calcul utilisés pour traiter les configurations qui seront**

retenues, en tenant compte en particulier de la limitation de la modération et des matériaux de structure des colis et des alvéoles de stockage.

Maîtrise des risques de criticité dans l'installation

L'Andra a présenté, durant l'instruction, les modélisations retenues dans les analyses de sûreté-criticité. L'IRSN note que l'Andra considère dans ses modèles de calculs les dimensions nominales des colis et des assemblages combustibles. Aussi, l'IRSN considère que, dans l'optique d'une demande d'autorisation de stocker les combustibles usés dans Cigéo, l'Andra devra tenir compte des tolérances de fabrication et des éventuelles incertitudes sur les dimensions géométriques retenues dans les études de sûreté-criticité. Ceci est d'autant plus important que les dimensions géométriques des assemblages combustibles impactent directement les quantités de matière fissile modélisées et éventuellement celles de modérateurs, lorsque l'assemblage est considéré sous eau.

Fonctionnement normal

L'Andra analyse [47] le risque de criticité (i) dans les zones de réception et de préparation des emballages de transport, (ii) dans les zones tampon d'entreposage de colis primaires ou de colis de stockage, (iii) lors des transferts des colis et (iv) dans les alvéoles de stockage.

Pour ce qui concerne les opérations effectuées à la réception et à la préparation des emballages de transport, l'Andra indique que les conditions d'exploitation rencontrées sont couvertes par l'agrément de transport et le respect de ses exigences. L'IRSN estime que l'observation formulée pour les opérations effectuées à la réception et à la préparation des emballages de transport des colis primaires MAVL et HA (cf. *supra*) s'applique également au cas des combustibles usés.

Pour les zones tampon d'entreposage de colis primaires dans l'installation de surface, l'Andra considère [47], en première approche, qu'un pas carré de l'ordre de 1 m entre les assemblages combustibles permettrait d'assurer la maîtrise du risque de criticité. Ceci apparaît acceptable au vu des entreposages d'assemblages combustibles existants dans les installations nucléaires. S'agissant des entreposages tampon de colis de stockage, l'Andra indique [47] qu'une distance bord à bord de 50 cm entre les colis de stockage pourrait être retenue. Ceci semble également acceptable mais il conviendrait que, dans le cadre d'une demande d'autorisation de stockage des combustibles usés, l'Andra présente les dispositions permettant de garantir les distances entre colis (primaire ou de stockage) retenues dans la démonstration de sûreté-criticité des zones tampon de l'installation de surface.

Pour ce qui concerne les opérations de transfert des colis, l'Andra indique [47] qu'un assemblage de combustible usé considéré isolément, en réflexion par 20 cm d'eau, couvre le cas d'un colis primaire isolé, la réflexion par 20 cm d'eau étant pénalisante au regard de la réflexion apportée par l'étui en acier du colis primaire. Elle précise qu'en l'absence de modération, les assemblages pris isolément contiennent une masse de matière fissile inférieure à la masse maximale admissible (correspondant au critère d'admissibilité $k_{\text{eff}} \leq 0,95$). Pour les colis de stockage, l'Andra indique que leur sous-criticité a été vérifiée par calcul en considérant les combustibles neufs et à sec. Elle a précisé durant l'instruction que des opérations de séchage seraient réalisées lors de l'introduction des assemblages combustibles dans les colis primaires. Ces éléments n'appellent pas de remarque. Il conviendrait toutefois, dans le cas d'une demande d'autorisation de stockage des combustibles usés, que l'Andra justifie que les

dispositions mises en place permettront de garantir l'absence d'eau dans les colis primaires et dans les colis de stockage.

Enfin, s'agissant des alvéoles de stockage, l'Andra indique [47] que les interactions entre les colis stockés resteront limitées compte tenu de la conception des colis de stockage (épaisseurs importantes des fonds et couvercles) et de leur disposition en alvéole (colis placés les uns derrière les autres). **Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN à ce stade.**

Situations incidentelles et accidentelles

L'Andra retient [47] différentes situations incidentelles et accidentelles pouvant impacter le risque de criticité. Ainsi, l'Andra retient (i) la chute d'un colis (primaire ou de stockage), (ii) le risque d'inondation, (iii) les risques liés à un incendie et (iv) les risques liés au séisme.

Pour ce qui concerne la chute d'un colis primaire, l'Andra indique qu'un endommagement de l'assemblage n'est pas de nature à remettre en cause la sous-criticité compte tenu de la limitation de la modération et que dans l'éventualité d'une chute entraînant une ruine totale du colis primaire, des calculs complémentaires seront effectués en s'appuyant sur la limitation de la masse en plus de la limitation de la modération. Dans le cas de la chute d'un colis de stockage, l'Andra indique que la limitation des hauteurs de manutention garantit l'absence de modification significative de la géométrie des assemblages combustibles.

S'agissant des risques d'agression pouvant impacter le risque de criticité, l'Andra précise que les dispositions retenues sur l'installation et présentées ci-dessus pour la réception des déchets MAVL et HA restent applicables pour les combustibles usés.

S'agissant du risque d'inondation qui peut modifier les conditions de modération, l'Andra prévoit la mise en place de mesures préventives telles que l'interdiction de circulation de tuyauteries de liquides dans les locaux accueillant des colis primaires. Elle a en outre réalisé des calculs considérant la présence d'eau dans les colis de stockage non encore fermés. Il en ressort que l'acceptation dans Cigéo des assemblages REP UOX/URE présentant des taux de combustion inférieurs à 17 GWj/tML nécessiterait des dispositions complémentaires, telles que la prise en compte des produits de fission et/ou la mise en place de chemise avec poison neutronique.

Pour ce qui concerne les risques liés à l'incendie, l'Andra indique [47] qu'elle privilégiera l'utilisation de systèmes d'extinction utilisant des matériaux non hydrogénés dans les locaux accueillant des combustibles usés et que « *dans le cas de l'utilisation d'eau ou d'autres matériaux hydrogénés dans des locaux voisins, leur migration vers les locaux concerné par la criticité serait empêchée* ».

Concernant la prise en compte du séisme, l'Andra indique que les zones d'entreposage seront dimensionnées de manière à conserver la géométrie des colis et que les autres équipements seront dimensionnés pour ne pas être projectiles.

L'ensemble de ces orientations et dispositions retenues par l'Andra n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN au stade du DOS.

7.1.4 THERMIQUE

L'Andra retient [39], parmi les fonctions de sûreté en exploitation, l'évacuation de la puissance thermique des déchets. Elle présente des objectifs de température à respecter en situations normale et incidentelle ou accidentelle. A titre d'exemple, l'Andra retient, pour maintenir les propriétés mécaniques des bétons, une température maximale de 65 °C en situation normale et 80 °C en situation incidentelle, **ce qui n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN à ce stade.**

Elle retient également, pour les colis d'enrobés bitumineux, une température maximale de 30 °C en situation normale, de 50 °C en situation incidentelle et de 180 °C en situation accidentelle, et enfin une température maximale au niveau de l'argilite de 90 °C afin de préserver les propriétés de confinement de la roche hôte sur le long terme. Ces critères sont examinés respectivement aux chapitres 7.2.1.7 relatif au cas des enrobés bitumineux en alvéoles MAVL et 5.4.1 relatif au transitoire thermo-hydromécanique dans les matériaux argileux. **Seul le critère de 180 °C en situation accidentelle pour les colis d'enrobés bitumineux appelle des remarques majeures de la part de l'IRSN (cf. chapitre 7.2.1.7).**

L'Andra a effectué une évaluation préliminaire des risques liés à la puissance thermique dégagée par les colis de déchets [39], dans les installations de surface et souterraine ainsi que lors du transfert des colis, sur la base de critères de puissance thermique de 15 W par colis primaire MAVL ou 60 W par colis de stockage et de 500 W par colis de stockage HA. **Ces critères, examinés au chapitre 3.1.5 du présent rapport relatif aux caractéristiques dimensionnantes des colis, n'appellent pas de remarque à ce stade.**

L'Andra indique [39] que cette évaluation préliminaire montre qu'aucune disposition particulière n'est nécessaire dans les locaux des installations de surface pour assurer la maîtrise des risques liés au dégagement thermique des colis et que les critères de température sont respectés dans les alvéoles de stockage MAVL, même en cas d'absence de ventilation. En outre, cette évaluation conclut que le critère de 90 °C au niveau de l'argilite n'est pas atteint dans le cas des alvéoles HA. De plus, l'Andra précise que la durée maximale de transfert doit être inférieure à un mois pour éviter la détérioration de la protection radiologique contre les neutrons des hottes HA, sous l'effet de la température, et inférieure à un mois et demi pour éviter la dégradation d'un composant des déchets MAVL.

Ces éléments n'appellent pas de remarque de la part de l'IRSN à ce stade. Ce type évaluation, que l'Andra prévoit d'affiner et de compléter pour le dossier de DAC, devrait permettre de répondre à l'engagement 2010 E5 [1] relatif à la présentation des critères de température retenus et des dispositions prévues pour maîtriser les risques liés aux dégagements thermiques.

Concernant le rôle dévolu à la ventilation, l'Andra retient, comme dans le « Dossier 2009 », pour la ventilation des galeries d'accès aux alvéoles HA, une fonction de maintien de conditions d'ambiance acceptables pour le personnel réalisant des interventions ponctuelles et n'en retient pas au niveau du quartier d'alvéole MAVL. Or, ainsi qu'indiqué ci-dessus, un critère de température maximale de 30 °C est notamment considéré pour les alvéoles MAVL contenant des enrobés bitumineux, lié au domaine de validité du modèle utilisé par l'Andra pour le relâchement de l'activité contenue dans ces colis en phase de post-fermeture. A cet égard, l'Andra a précisé au cours de la réunion préparatoire à la réunion des groupes permanents tenue le 15 mars 2017 que la ventilation n'avait pas de rôle spécifique concernant l'évacuation de la puissance thermique, les enrobés bitumineux étant par nature non exothermiques en fonctionnement normal. L'Andra ajoute que si ce critère « *n'est pas satisfait sans traitement de l'air, une évaluation du caractère acceptable ou non de la situation rencontrée est à mener notamment en fonction*

de la durée de dépassement du critère et du niveau de température pendant cette phase » [55]. Elle a précisé qu'une centrale de traitement de l'air était à l'étude dans le but d'injecter de l'air frais depuis la surface et contrôler la température et l'hygrométrie dans les ouvrages souterrains.

L'IRSN estime que l'Andra devra justifier, dans le dossier de DAC, les dispositions techniques mises en œuvre pour le maintien des critères de température en phase d'exploitation dans les alvéoles MAVL contenant des colis de déchets d'enrobés bitumineux. Ce point fait l'objet de l'engagement E37-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

7.2 AGRESSIONS D'ORIGINE INTERNE

7.2.1 INCENDIE

7.2.1.1 Démarche

Démarche d'analyse des risques liés à l'incendie

A l'instar du dossier « Maîtrise des risques en exploitation », l'Andra fonde sur son référentiel incendie [101] les objectifs de sûreté et la démarche d'analyse des risques liés à l'incendie qu'elle retient pour les installations de Cigéo, en particulier pour l'installation souterraine et les liaisons surface-fond, qui présentent des spécificités par rapport aux INB « classiques ». Les objectifs de sécurité incendie sont ainsi de (i) protéger la vie et la santé des personnes présentes dans les installations, (ii) préserver l'environnement, (iii) maintenir les fonctions de sûreté et (iv) préserver l'activité industrielle et les installations.

Afin d'atteindre ces objectifs, l'Andra retient [39] des dispositions techniques et organisationnelles qui visent :

- la prévention des départs de feu,
- la détection et l'extinction rapide des départs de feu,
- la limitation de l'aggravation et de la propagation d'un incendie qui n'aurait pas pu être maîtrisé afin de minimiser son impact sur la sûreté nucléaire et permettre l'atteinte ou le maintien d'un état sûr de l'installation,
- la gestion de situations d'accident résultant d'un incendie n'ayant pas pu être maîtrisé de façon à limiter les conséquences pour les personnes et l'environnement.

Ainsi, pour l'analyse des risques liés à l'incendie, la démarche de l'Andra consiste à [39] :

- identifier les sources de dangers et les cibles à protéger,
- déterminer les dispositions de prévention et de protection adaptées,
- établir les scénarios pour justifier du caractère suffisant des dispositions de protection contre l'incendie (DPCI) retenues,
- prendre en compte la défaillance interne⁶⁰ la plus défavorable d'un EIP sollicité par l'incident ou l'accident, indépendamment de l'événement déclencheur considéré.

⁶⁰ La défaillance interne correspond à un dysfonctionnement, une panne ou un endommagement d'un élément de l'installation ou présent dans l'installation, y compris résultant d'actions humaines inappropriées [4].

Cette démarche était déjà celle présentée dans le dossier « Maîtrise des risques en exploitation » et n'appelle pas de commentaire de l'IRSN, à l'exception de ce dernier point. En effet, lors de cette précédente instruction (ainsi que dans le référentiel incendie actuel [101]), l'Andra retenait la prise en compte de la défaillance d'un équipement actif de protection contre l'incendie et non celle la plus défavorable d'un EIP sollicité par l'incident ou l'accident. **L'IRSN considère que la prise en compte de la défaillance interne la plus défavorable d'un EIP sollicité par l'incident ou l'accident est satisfaisante.**

Dans la mise en œuvre de sa démarche, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que les scénarios d'incendie n'impliquant pas de colis (seul ou dans une hotte) et ne conduisant donc pas à des conséquences radiologiques, n'étaient pas repris dans l'étude des situations de dimensionnement et n'étaient présentés qu'au titre de l'étude de maîtrise des risques liés à l'incendie. Il s'agit notamment des scénarios d'incendie dans la descenderie de service, dans une recoupe ou en ZSL. Pour ces scénarios, l'Andra a précisé en instruction ne prévoir une proposition de DPCI qu'à l'horizon de la DAC. L'IRSN observe que l'absence de conséquences, notamment par effet indirect, n'est pas démontrée, en particulier l'absence d'impact sur des EIP. A cet égard, l'IRSN rappelle que l'arrêté INB [4] préconise que la démonstration de sûreté inclue l'analyse de la perte éventuelle d'EIP à la suite d'un incendie. A titre illustratif, l'IRSN note que bien que la ventilation nucléaire soit classée EIP, l'Andra ne présente pas de scénario d'incendie dans les locaux DNF (dernier niveau de filtration) des installations de surface et souterraine, notamment eu égard à une agression des filtres THE. L'Andra a précisé au cours de l'instruction que ces locaux feront l'objet d'une analyse de risques au même titre que tous les locaux des installations. Pour mener cette analyse, l'IRSN considère que l'ensemble des effets de l'incendie doivent être pris en compte. A cet égard, l'IRSN souligne que les équipements électroniques sont particulièrement sensibles aux effets des fumées. Or, l'IRSN note que la version révisée du référentiel incendie de l'Andra [101] définit des exigences relatives aux fumées uniquement pour l'évacuation du personnel ; aussi, l'IRSN estime que ces exigences devraient être complétées avec des exigences à l'égard des fumées, pour la protection des EIP. Enfin, l'IRSN rappelle que l'Andra s'est engagée à justifier la capacité des DPCI à prévenir et à limiter les conséquences d'un incendie pour toutes les cibles de sûreté (engagement 2010 E7.2a)[1]. **Il conviendra donc que l'Andra présente, dans le dossier de DAC, toutes les situations d'incendie ayant un impact direct ou indirect sur les EIP afin d'évaluer si cet impact pourrait avoir des effets sur la sûreté des installations et statuer sur la suffisance des DPCI.**

D'une manière générale, la maîtrise des risques liés à l'incendie [39] présentée par l'Andra repose principalement sur les trois principes suivants :

- la limitation des charges calorifiques et la détection, éventuellement asservie à un système d'extinction,
- le comportement et la qualification au feu des emballages de transport (ET), des conteneurs de stockage et des hottes,
- l'intervention des équipes de secours présentes *in situ*.

Le principe de limitation des charges calorifiques et de détection, classique dans les INB, ainsi que les orientations retenues à ce stade pour satisfaire ce principe (par exemple, transfert de colis de stockage sur rail plutôt que sur pneus comme indiqué au chapitre 7.2.3 du présent rapport) sont satisfaisants. A cet égard, l'IRSN note que les charges calorifiques ne sont pas totalement définies en termes de nature, de localisation et de quantité mais que l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que la définition plus précise, prévue dans le dossier de DAC, des équipements et des charges calorifiques associées permettra de caractériser le feu de référence à retenir. En

outre, l'IRSN rappelle que l'Andra s'est engagée à consolider, dans le dossier de DAC, les scénarios d'incendie de référence présentés et justifier le caractère enveloppe des effets des incendies retenus pour le dimensionnement des DPCI (engagement 2010 E7.3 [1]).

Les emballages de transport présentent une résistance à l'incendie selon l'arrêté relatif aux transports de marchandises dangereuses par voie terrestre [209]. Pour ce qui concerne le comportement et la qualification au feu des hottes, l'Andra indique [39] que celles-ci sont protégées des effets d'un incendie par la présence de protections thermiques au niveau de l'enceinte et de la porte permettant d'atteindre une performance EI120⁶¹ et que les pieds et le châssis sont R120 sous incendie conventionnel (courbe de feu selon la norme ISO 834). S'agissant des conteneurs de stockage, l'Andra a transmis les essais de tenue au feu réalisés sur des conteneurs de type B2.1 [102][103] réalisés dans le cadre du programme quadripartite sur les enrobés bitumineux [236]. Ceux-ci sont examinés au chapitre 7.2.1.7 du présent rapport. L'Andra a indiqué que des essais de tenue au feu avaient été également réalisés sur des conteneurs de type CS4 et CS3, ce dernier présentant des épaisseurs de voile de béton représentatives des conteneurs de types CS1, CS2 et CS5 ; toutefois, les résultats et les analyses de ces essais n'ont pas été transmis dans le cadre de l'instruction du DOS. Enfin, dans les installations de surface, l'Andra indique qu'aucun entreposage de conteneurs de stockage sans couvercle n'est actuellement prévu (notamment dans les zones tampon). Ainsi, dans l'installation de surface et en dehors des cellules de « déchargement ET », de « contrôle C5⁶² », de « mise en conteneur » et de déconditionnement, les colis primaires bénéficient toujours de l'inertie thermique offerte par les conteneurs.

Ces différentes dispositions générales n'appellent pas de remarque de la part de l'IRSN.

Définition des situations de dimensionnement aux risques liés à l'incendie

Les situations d'incendie sont identifiées, conformément à la démarche de sûreté (cf. chapitre 6.1 du présent rapport), en cohérence avec les niveaux de défense en profondeur, ce que l'Andra traduit de la façon suivante :

- les situations incidentelles relèvent du fonctionnement normal : le départ de feu est détecté et une action automatique ou manuelle permet son extinction et l'absence de propagation,
- les situations accidentelles de dimensionnement sont des situations incidentelles cumulées avec la défaillance d'une DPCI (par exemple, une extinction automatique défaillante),
- les situations accidentelles de dimensionnement du PUI sont des situations accidentelles de dimensionnement avec une défaillance supplémentaire indépendante (par exemple, une extinction automatique défaillante cumulée à une dégradation du confinement). L'Andra précise [39] que ces situations ont pour but de vérifier l'absence d'effet falaise,
- les situations exclues sont des situations physiquement impossibles ou extrêmement improbables (*i.e.* situations pour lesquelles « un nombre important de dispositions robustes est prévu »).

Dans sa définition des situations de dimensionnement aux risques liés à l'incendie, l'Andra postule [39] un départ de feu, cumulé avec la défaillance d'une DPCI la plus défavorable et indépendante de l'évènement déclencheur considéré.

⁶¹ Classement selon la norme NF EN 13501-2 avec : E : Etanchéité au feu ; I : Isolation thermique ; R : Résistance mécanique ou stabilité ; 120 : classement E, I et/ou R pendant 120 minutes.

⁶² Pour rappel, le poste de « contrôle C5 » correspond au 5^{ème} niveau de contrôle et n'a aucun rapport avec les colis C5.

Sur le plan des principes, la démarche de définition des situations de dimensionnement vis-à-vis des risques liés à l'incendie n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN à ce stade en dehors de celles présentées au chapitre 6.1 du présent rapport, relatif à la démarche de sûreté en phase d'exploitation. La déclinaison de cette démarche pour les risques liés à l'incendie est examinée ci-dessous.

7.2.1.2 Situations enveloppes de dimensionnement

Parmi les scénarios d'incendie retenus, l'Andra identifie les deux situations enveloppes de dimensionnement suivantes :

- dans l'installation nucléaire de surface EP1, un incendie du chariot impliquant un colis primaire au poste de « contrôle C5 » (situation A7 [39]),
- dans l'installation souterraine, un incendie du pont stockeur impliquant des colis de stockage dans un alvéole MAVL plein (situation A17 [39]).

La situation A17 est examinée, dans un cadre plus large, dans le chapitre 7.2.1.7 relatif au cas des enrobés bitumineux en alvéole MAVL.

S'agissant du scénario A7, l'Andra considère [39] que l'événement initiateur est un départ de feu sur un coffret électrique du chariot, qui se propage aux équipements présents dans la cellule de « contrôle C5 ». Le système d'extinction embarqué sur le chariot et la détection automatique incendie en ambiance sont considérés défectueux et seul le colis primaire présent dans la cellule est impacté. Elle précise que ce feu est de faible intensité et que sa durée est limitée par la présence d'un système fixe d'extinction en ambiance dans la cellule. Ainsi, l'Andra ne retient que la mobilisation de la contamination surfacique externe du colis primaire.

En premier lieu, l'IRSN estime que la double défaillance de DPCI retenue par l'Andra n'est pas la plus défavorable. En effet, la défaillance de l'extinction embarquée cumulée avec celle du système fixe d'extinction conduirait à considérer un incendie plus important que celui retenu par l'Andra.

En outre, l'IRSN souligne que les colis primaires les plus sensibles à un incendie sont les colis d'enrobés bitumineux pour lesquels l'Andra retient un critère de température maximal à ne pas dépasser en situations incidentelle et accidentelle afin de garantir l'intégrité de la fonction de confinement du colis primaire (cf. chapitre 7.2.1.7 relatif au cas des enrobés bitumineux en alvéole MAVL). Compte tenu des incertitudes liées au choix de ce critère de température maximale (cf. chapitre 7.1.4), l'hypothèse d'absence de mobilisation par l'incendie du contenu du colis primaire présent dans la cellule de « contrôle C5 » pourrait être remise en cause, le colis primaire ne bénéficiant pas, dans cette cellule, de la protection thermique offerte par le conteneur de stockage. Aussi, eu égard aux dispositions présentées par l'Andra et à l'absence de définition précise des caractéristiques des charges calorifiques, l'IRSN considère qu'à ce stade l'absence d'agression du contenu du colis primaire dans la cellule de « contrôle C5 » n'est pas démontrée. En conséquence, l'IRSN estime que l'Andra devrait *a minima* considérer un scénario d'incendie impliquant l'intégralité du contenu du colis primaire présent dans la cellule de « contrôle C5 » dans les scénarios retenus pour le dimensionnement de l'installation nucléaire de surface EP1.

A cet égard, l'IRSN rappelle que la décision de l'ASN relative au rapport de sûreté des INB [5] précise que « lorsque des scénarios sont retenus pour définir les dispositions de maîtrise des risques liés à l'incendie, l'exploitant présente [...] les éléments permettant d'apprécier leur caractère enveloppe en prenant notamment en compte :

- l'ensemble des effets de l'incendie,

- *la combustion de l'ensemble des matières mobilisables par l'incendie,*
- *les éventuels effets défavorables des actions d'intervention et de lutte contre l'incendie prévues ».*

A titre illustratif, l'IRSN souligne que les exploitants de plusieurs installations d'entreposage d'enrobés bitumineux existantes considèrent, pour le dimensionnement des **DPCI**, un scénario d'incendie impliquant l'intégralité du contenu d'un colis de déchets voire de plusieurs d'entre eux.

L'Andra a précisé au cours de l'instruction que l'intervention humaine à l'intérieur de la cellule de « contrôle C5 » étant exclue, le déclenchement de l'extinction en ambiance en cas de défaillance de la détection automatique en ambiance se fera manuellement depuis la salle de commande suite à une détection par vidéosurveillance, non classée **EIP**, sans attendre l'intervention des équipes des secours. L'IRSN note que l'utilisation d'une caméra en tant que dispositif de détection incendie n'est pas une pratique habituelle. A cet égard, l'IRSN souligne que le retour d'expérience d'autres exploitants⁶³ soulève des problématiques concernant notamment le champ de vision de la caméra, qui peut s'avérer incomplet, et l'inaptitude de ce type de dispositif à détecter un point chaud sans flammes ni fumées visibles, ce qui remet en question la rapidité de la détection et du déclenchement de l'extinction qui suit. **En conséquence, l'IRSN estime que la rapidité d'une action basée sur un système de vidéosurveillance n'est pas garantie. L'IRSN considère que ceci renforce la nécessité de considérer un scénario d'incendie impliquant l'intégralité du contenu du colis primaire présent dans la cellule de « contrôle C5 » dans les scénarios retenus pour le dimensionnement de l'installation nucléaire de surface.**

R1. Aussi, l'IRSN recommande que, dans le dossier de **DAC, le scénario d'incendie de dimensionnement de l'installation de surface mette en jeu l'intégralité du contenu du colis primaire le plus sensible à l'incendie, en l'occurrence un colis d'enrobé bitumineux si l'option de leur stockage est maintenue.**

Enfin, comme présenté dans le chapitre 2.5.2.1, les cellules de « déchargement **ET** », de « contrôle C5 » et de « mise en conteneur » sont incluses dans un seul volume, dit « cellule blindée de déchargement », qui constitue une unique zone de feu au sens de la « Décision incendie » de l'ASN [234]. A cet égard, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction qu'une zone d'entreposage de colis primaires dans la cellule « déchargement **ET** » (24 emplacements) était prévue à l'intérieur de la zone de feu. L'Andra a précisé que (i) les dispositions de réduction de potentiel calorifique et de détection ainsi que la géométrie des parois et des portes des cellules (dimensionnées pour la radioprotection) limitent la propagation thermique d'un éventuel départ de feu d'une cellule vers la cellule adjacente et notamment la propagation d'un incendie en cellule de « contrôle C5 » vers la zone d'entreposage située dans la cellule « déchargement **ET** » et (ii) la faible charge calorifique présente dans cette cellule, apportée par le pont roulant, et son éloignement par rapport à la zone d'entreposage permettent de ne pas prendre en compte plusieurs colis primaires impliqués dans un incendie. Or, dans les cellules de « déchargement **ET** » et de « contrôle C5 », les colis primaires ne sont pas placés dans des conteneurs de stockage et sont donc particulièrement vulnérables à un incendie (cf. *supra*). Aussi, l'IRSN souligne l'importance qu'un incendie au niveau de la cellule de « contrôle C5 » ne se propage pas aux colis présents dans la zone d'entreposage située au niveau de la cellule de « déchargement **ET** » ou qu'un incendie dans la cellule de « déchargement **ET** » n'implique pas l'ensemble des colis primaires présents dans la zone d'entreposage. En outre, l'IRSN considère qu'un

⁶³ Par exemple l'événement de Penly 2 du 5 avril 2012 concernant le repli à la suite d'un début d'incendie du groupe motopompe primaire RCP 051 PO (GMPP n° 1) ayant entraîné un arrêt automatique du réacteur (avis IRSN/2015-00416 du 18 décembre 2015).

dimensionnement de parois pour la radioprotection des travailleurs ne constitue pas une disposition suffisante pour permettre de démontrer la non-propagation d'un incendie d'une zone à l'autre. Pour rappel, la « décision incendie » [234] indique que l'exploitant doit en priorité avoir recours à des secteurs de feu. Cette exigence est encore plus forte notamment si la zone d'entreposage de la cellule « déchargement ET » est maintenue par l'Andra. Aussi, pour une installation neuve, il conviendra que l'Andra apporte la justification que la cellule de « déchargement ET » ne nécessite pas de faire l'objet d'une sectorisation de type secteur de feu et qu'il n'y a pas de risque de propagation d'une cellule à l'autre.

En outre, l'IRSN relève que la zone d'entreposage ne comprend pas, au stade du DOS, de disposition constructive permettant d'exclure la propagation d'un incendie d'un colis à un autre. Or, la zone de feu que constitue la « cellule blindée de déchargement » est dimensionnée à un incendie d'un unique colis primaire [39]. Aussi, l'IRSN estime nécessaire que la conception de la zone d'entreposage permette d'exclure la propagation d'un incendie entre colis primaires. A défaut, l'IRSN considère qu'un scénario d'incendie impliquant l'ensemble des fûts présents dans la zone d'entreposage doit être étudié dans le cadre du dimensionnement de l'installation.

Au cours de la réunion préparatoire, l'Andra a évoqué la possibilité d'interdire l'entreposage des colis primaires d'enrobés bitumineux dans la cellule « déchargement ET ». Dans ce cas, l'IRSN relève que dans la configuration la plus pénalisante, un colis au maximum serait présent dans chacune des trois cellules. Dans ce contexte, l'IRSN estime que l'exigence de sectorisation des trois cellules constituant la « cellule blindée de déchargement » (« déchargement ET », « contrôle C5 » et « mise en conteneur de stockage ») pourrait se limiter à la mise en place de trois zones de feu.

Par ailleurs, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que la conception des cellules de déconditionnement (*i.e.* chaîne de traitement des colis primaires/colis de stockage non conformes) et de contrôle de second niveau n'était pas suffisamment détaillée à ce stade pour permettre une évaluation précise des scénarios d'incendie qui pourraient y survenir, seul les principes de sûreté et options de conception étant définis comme similaires à ceux des autres cellules. Elle a précisé que le caractère enveloppe de la situation A7 serait vérifié pendant l'APD sur la base d'éléments détaillés. L'IRSN note que, dans ces cellules de déconditionnement, les colis primaires peuvent ne pas être inclus dans des conteneurs de stockage.

En conclusion, l'IRSN considère que l'Andra devra présenter, dans le dossier de DAC, des zones de feu au sens de la décision incendie de l'ASN permettant de garantir l'absence de propagation d'un incendie entre les cellules « déchargement ET », « contrôle C5 », « mise en conteneur », « déconditionnement » et « contrôle de 2nd niveau » de l'installation nucléaire de surface EP1. Ce point fait l'objet de l'engagement E38-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

Enfin, l'Andra a confirmé au cours de la réunion préparatoire que les cellules « déchargement ET » et « mise en conteneur » seraient pourvues d'une détection en ambiance et d'un système fixe de lutte contre l'incendie. Ceci est satisfaisant.

7.2.1.3 Situations de dimensionnement du PUI

Les deux situations de dimensionnement du PUI relatives aux risques liés à l'incendie retenues par l'Andra sont [39] :

- pour les installations nucléaires de surface, la situation A7 cumulée à la défaillance de l'extinction ambiance (situation P4). Cette situation mobilise 25 % du terme source présent au poste de contrôle,

- pour l'installation souterraine, la situation A17 cumulée à la défaillance d'un conteneur de stockage (situation P9). Cette situation mobilise 25 % du terme source présent dans le colis de stockage.

S'agissant de la situation P4 dans l'installation de surface, l'Andra postule la défaillance du système d'extinction automatique sans envisager le risque de propagation pouvant conduire à un incendie de plus grande importance. Or, l'IRSN souligne qu'un scénario d'incendie se propageant à l'extérieur de la sectorisation dans laquelle le départ de feu a eu lieu est classiquement pris en compte pour le dimensionnement de l'organisation de crise des installations nucléaires.

Ainsi, l'IRSN estime que l'Andra devra analyser, dans le dossier de DAC, le risque de propagation d'un incendie en dehors de son volume initial et présente, le cas échéant, un scénario de dimensionnement du PUI associé. Ce point fait l'objet de l'engagement E39-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

En tout état de cause, les conclusions de l'analyse de l'IRSN présentées ci-avant et dans le chapitre 7.2.1.7 relatif au cas des enrobés bitumineux en alvéole MAVL conduisent à envisager des scénarios de dimensionnement plus pénalisants que ceux présentés par l'Andra dans le cadre du PUI. L'IRSN estime donc que les situations de dimensionnement du PUI retenues au stade du DOS ne peuvent *a fortiori* pas être considérées comme enveloppes.

7.2.1.4 Situations exclues

Certaines situations dites « *de dimensionnement* » et « *hors dimensionnement* » présentées dans le dossier « Maîtrise des risques en exploitation » ne sont plus mentionnées dans le DOS, notamment :

- dans la descenderie, un incendie faisant suite à une collision du funiculaire sur les butées d'arrêt, sans déclenchement du système d'extinction ;
- dans les galeries, un incendie faisant suite à une collision du chariot de transfert sur les butées d'arrêt, sans déclenchement du système d'extinction ;
- dans les galeries, un incendie du chariot de transfert avec un aggravant lié à la présence d'équipements de démantèlement ou de fermeture conduisant à une intensité de feu supérieure au feu de référence, sans déclenchement du système d'extinction.

Concernant les deux premiers scénarios, l'Andra a indiqué au cours de la présente instruction, sans apporter d'éléments de justification, que contrairement aux précédents dossiers, il n'est plus postulé qu'un choc conduise à un départ de feu, « *au regard des nouvelles dispositions prévues* » qu'elle n'a toutefois pas présentées. Ce point devra donc être justifié dans le cadre de la DAC.

Concernant le dernier scénario, l'Andra a précisé au cours de l'instruction que la logique de fermeture de Cigéo, qui ne prévoit plus la concomitance de transferts de matériaux de fermeture et d'activités d'exploitation, conduit à l'exclusion de ce scénario. Elle précise que, dans ce contexte, un incendie du chariot de transfert ne pourra pas être aggravé par des équipements de démantèlement ou de fermeture se trouvant à proximité. Les risques induits par la coactivité, examinés au chapitre 7.2.7 du présent rapport, n'appellent pas de remarque à ce stade.

L'installation de surface comporte plusieurs zones tampon qui sont susceptibles d'accueillir, et pour des durées indéfinies à ce stade, plusieurs colis de stockage, soit avant leur conditionnement (zones tampons « CS non confectionnés » et « CP non conformes »), soit après (zones tampons « CS confectionnés » et « CS non conformes ») (cf. chapitre 2.6.1.1). A ce stade, l'Andra n'identifie aucune situation d'incendie dans ces zones tampons. Elle a

précisé au cours de l'instruction que la présence de charges calorifiques « *limitées* » permet de ne considérer qu'un incendie de faible intensité, et considère ainsi qu'un incendie dans ces zones est couvert par la situation A17 (incendie dans un alvéole MAVL). De ce fait, l'Andra ne prévoit pas de disposition particulière vis-à-vis des risques liés à l'incendie dans ces zones. L'IRSN souligne que la conception de ces zones n'est pas présentée à ce stade. En tout état de cause, ces zones étant considérées couvertes par similitude avec la situation A17, les dispositions de maîtrise des risques liés à l'incendie retenues par l'Andra pour les alvéoles MAVL ainsi que les conclusions et la recommandation R2 issues de l'analyse de l'IRSN (cf. chapitre 7.2.1.7 du présent rapport) devraient logiquement s'appliquer à ces zones, ce qui reviendrait à (i) les classer secteur de feu avec un degré coupe-feu d'*a minima* 2 heures, (ii) les équiper d'une détection en ambiance et d'un système fixe d'extinction et (iii) prévoir des dispositions constructives permettant d'exclure la propagation thermique entre colis de stockage.

L'IRSN estime que, dans le dossier de DAC, les zones tampon de l'installation de surface devront être pourvues de systèmes de détection automatique en ambiance et d'extinction fixe d'incendie. L'Andra devra en outre justifier la classification de ces zones au sens de la décision incendie de l'ASN. Ce point fait l'objet de l'engagement E40-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

Selon l'IRSN, cette justification de la classification de ces zones au sens de la décision incendie de l'ASN s'entend notamment comme la démonstration que (i) un incendie à proximité des zones tampon ne se propage pas au niveau de ces zones, (ii) la conception des zones tampon permette la limitation de la dissémination de substances radioactives hors du volume de ces zones en cas de départ de feu en leur sein et comme la possibilité de mettre en place des dispositions de limitation de la propagation thermique entre colis de déchets (colis primaires et/ou colis de stockage) a été étudiée.

Enfin, l'Andra considère [39] qu'un incendie dans le hall de déchargement des convois conduisant à la perte de confinement d'un ou plusieurs emballages de transport est une situation exclue, le hall ne contenant pas de charge calorifique importante (obligation de dételer la remorque du tracteur routier et la locomotive par exemple). Elle a précisé au cours de l'instruction, que ce hall serait équipé de dispositions d'extinction situées à proximité des engins ou éventuellement fixes et que les opérations de chargement/déchargement des emballages de transport requerraient la présence systématique de personnel formé à l'intervention. En outre, l'Andra a précisé que des dispositions de maîtrise de la propagation d'un incendie se déclarant dans le hall vers les bâtiments de l'installation adjacents sont prévues (à ce stade, des parois *a minima* coupe-feu 2 heures). Ceci est satisfaisant sur le principe.

7.2.1.5 Dispositions de protection contre l'incendie

7.2.1.5.1 Détection

L'Andra indique [39] que la détection incendie dans les installations de Cigéo repose notamment sur (i) des systèmes de détection automatique d'incendie en ambiance des locaux ou galeries, implantés au plus près des sources potentielles d'incendie (par exemple les armoires électriques), (ii) des dispositifs complémentaires de détection incendie implantés si besoin dans les armoires électriques des équipements participant au procédé de conditionnement, au transfert et à la mise en stockage et (iii) un système de vidéo-surveillance permettant un contrôle visuel dans les zones en alarme feu. Elle a indiqué au cours de l'instruction que seuls la partie utile des alvéoles MAVL et les alvéoles HA sont dépourvus de détection incendie en ambiance en raison de l'absence de charge calorifique et de sources d'ignition dans ces zones en dehors des opérations de mise en place des colis. Elle a

précisé que lors de ces opérations, la détection était assurée par le dispositif embarqué sur l'équipement de mise en stockage.

L'utilisation du système de vidéo-surveillance pour un contrôle visuel dans les zones en alarme feu et le cas particulier de la partie utile des alvéoles MAVL sont traités respectivement aux chapitres 7.2.1.2 et 7.2.1.7.

L'IRSN estime que le principe d'installer des systèmes de détection incendie au plus près des sources potentielles d'incendie est satisfaisant. Néanmoins, il conviendrait que les locaux contenant des EIP soient également pourvus de tels systèmes. Dans le cas contraire, l'Andra devra démontrer l'absence d'impact d'un incendie dans ces locaux sur la sûreté de l'installation.

7.2.1.5.2 Sectorisation

Au stade du DOS, l'Andra présente [39] les mesures de sectorisation retenues en première approche dans les locaux ou groupe de locaux identifiés comme contenant un potentiel calorifique mobilisable « important » et susceptible d'agresser des substances dangereuses, radioactives et/ou des EIP. Elle retient, par exemple, les secteurs de feu suivants :

- dans l'installation de surface : les locaux contenant des substances dangereuses et/ou radioactives mobilisables par un incendie et contenant un potentiel calorifique mobilisable ; en fonction des conséquences potentielles, un ou des secteurs de confinement pourront être mis en place le cas échéant ;
- dans les descenderies : les recoupes, niches et locaux électriques des descenderies ;
- dans l'installation souterraine : les locaux de la ZSL Exploitation, les recoupes, niches et locaux électriques dans les galeries de liaison et d'accès MAVL et HA, l'ensemble constitué de la cellule de manutention et de la partie utile des alvéoles MAVL.

Le cas particulier de la « cellule blindée de déchargement », constituée des cellules de déchargement des emballages de transport verticaux, de « contrôle C5 » et de mise en conteneur et considérée comme étant une unique zone de feu, fait l'objet de l'engagement E38-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017 présentée au chapitre 7.2.1.2.

Au niveau des alvéoles MAVL, comme présenté au chapitre 7.1.2 relatif à la dissémination, la façade d'accostage située entre la galerie d'accès et la cellule de manutention comprend la porte d'accostage des hottes, les passages pour la ventilation de l'alvéole et un sas personnel/matériel. **Par conséquent, l'IRSN estime que tous les éléments constitutifs de cette façade d'accostage doivent être pris en compte pour le dimensionnement de la sectorisation incendie.** Ce point fait l'objet de l'engagement E41-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport et présenté au chapitre 7.2.1.6 relatif à la conduite de la ventilation en situation d'incendie.

Pour les autres locaux, l'IRSN observe que les principes de sectorisation incendie se sont affinés par rapport aux précédents dossiers, notamment pour les installations de surface et la ZSL, de façon satisfaisante.

7.2.1.5.3 Moyens de lutte contre l'incendie et d'évacuation du personnel

L'Andra retient [39] comme moyens d'intervention et de lutte contre l'incendie (i) des moyens de secours portatifs mobiles (extincteurs...) appropriés aux risques, (ii) des systèmes d'extinction fixes ou embarqués, (iii) un groupe d'intervention de secours, (iv) des réseaux incendie en surface et en souterrain et (v) des véhicules d'intervention incendie.

Pour ce qui concerne les systèmes d'extinction fixes ou embarqués, l'Andra a précisé au cours de l'instruction que les différents moyens de manutention des colis seront équipés de systèmes d'extinction embarqués et localisés au plus près des sources de danger d'incendie. Pour les systèmes d'extinction fixes en ambiance dans les cellules blindées de l'installation de surface, le type d'agent extincteur et les modalités d'enclenchement de ces systèmes (automatique, manuel, alimenté par les équipes de secours...) ne sont pas définis au stade du **DOS**, hormis pour la cellule de « contrôle C5 » pour laquelle un enclenchement manuel depuis la salle de commande ne nécessitant pas l'intervention des équipes de secours est envisagé.

S'agissant des réseaux incendie, l'Andra indique [39] que des colonnes sèches desservent l'installation de surface avec des prises d'incendie à l'intérieur de l'installation et des raccords d'alimentation à l'extérieur au niveau des voies empruntées par les engins. Dans l'installation souterraine, il s'agira d'un réseau déployé à partir de chacune des descenderies. A cet égard, l'Andra a précisé au cours de l'instruction qu'elle retenait le principe d'une part de répartition des prises d'incendie pour permettre la mise en œuvre des moyens d'extinction des équipes d'intervention, d'autre part de l'atteinte de tous les locaux dépourvus de systèmes fixes d'aspersion par les équipes d'intervention, à l'exception de la partie utile de l'alvéole **MAVL** et des alvéoles **HA**.

Pour ce qui concerne plus spécifiquement les modalités d'intervention des équipes de secours dans la descenderie et les galeries de l'installation souterraine, l'Andra considère deux cas de figure :

- en configuration « monotube » : les secours pourront accéder des deux côtés de la portion de galerie sinistrée, isolée par les portes de compartimentage ;
- en configuration « bitube » : les secours pourront accéder à la portion de galerie sinistrée *via* les recoupes entre la galerie saine et la galerie sinistrée ; pour les descenderies, l'intervention se fera de manière privilégiée à partir de l'installation souterraine, les fumées allant dans le sens ascendant.

Des cheminements piétons protégés sont prévus dans les descenderies et dans les galeries (liaison et retour d'air) pour l'évacuation du personnel présent dans l'installation souterraine. Des niches de secours pour la mise à l'abri du personnel sont également prévues, dans la **ZSL** et les galeries d'accès des alvéoles **MAVL** au niveau de la paroi d'accostage. Enfin, l'Andra indique que les ascenseurs des puits sont utilisables aussi bien pour l'intervention que pour l'évacuation du personnel [39].

Les principes d'intervention et d'évacuation du personnel présentés à ce stade n'appellent pas de remarque de la part de l'IRSN.

L'IRSN rappelle toutefois qu'à l'issue de l'instruction du dossier « Maîtrise des risques en exploitation » [21], l'Andra s'était engagée, à l'échéance de la **DAC**, à compléter les exigences de son référentiel incendie relatives à l'opacité et la toxicité des fumées (2014 E9) [1]). Le nouvel indice du référentiel incendie de l'Andra [101] définit des exigences de visibilité (critère de distance supérieur à 20 m), un seuil des effets thermiques et des valeurs limites de concentration en gaz toxiques et en oxygène. Néanmoins, ces critères ne sont associés qu'à l'évacuation du personnel et non à l'intervention des secours. **Aussi, même si l'IRSN estime que les critères présentés dans le**

référentiel incendie sont satisfaisants, il considère que la réponse à l'engagement reste à compléter vis-à-vis de l'intervention des secours, dans le dossier de [DAC](#).

7.2.1.6 Conduite de la ventilation en situation d'incendie

Les dispositions relatives à la gestion de la ventilation en situation d'incendie retenues par l'Andra [39] dans l'installation de surface sont similaires à celles retenues dans les [INB](#) classiques à savoir (i) arrêt du soufflage par fermeture du clapet, (ii) maintien de l'extraction du local sinistré aussi longtemps que possible, (iii) arrêt de l'extraction du local et passage en confinement statique en cas de dépassement des critères de tenue de l'extraction du local (température en amont des filtres [THE](#), différence de pression aux bornes des filtres) et (iv) maintien de la ventilation des zones adjacentes au local en feu. **Ceci est satisfaisant.** L'Andra précise que les escaliers sont mis à l'abri des fumées par mise en surpression. L'IRSN relève que l'Andra n'a pas défini, au stade du [DOS](#), les types d'agent extincteur qui seront *in fine* retenus (cf. *supra*) et par conséquent signale que ces principes de pilotage de la ventilation en situation d'incendie peuvent ne pas être compatibles avec certains types d'extinction fixe automatique comme, par exemple, la mousse haut-foisonnement ou l'utilisation d'un gaz inhibiteur qui nécessitent le passage en confinement statique du local pour être efficaces.

Dans la descenderie, la gestion de la ventilation en situation d'incendie consiste en la mise en œuvre d'une ventilation ascendante pour la gestion des fumées, dotée d'une extraction au niveau de la tête de descenderie avec maintien d'une vitesse d'air suffisante en pleine section pour s'assurer de l'absence de retour de fumée en amont du feu. **Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN à ce stade.**

En cas d'incendie dans la [ZSL](#) Exploitation, en galerie de liaison ou d'accès [HA](#) ou en galerie de liaison [MAVL](#), l'Andra retient [39] un compartimentage de longueur maximale de 800 m et la fermeture des portes de compartimentage qui encadrent la zone en feu, l'apport d'air étant alors réalisé à l'aide d'une baie de transfert implantée au niveau de chaque porte de compartimentage. Les fumées du compartiment en feu sont évacuées par la ventilation grâce à l'ouverture de trappes, espacées en moyenne de 100 m. L'Andra indique également que les recoupes adjacentes à la zone en feu sont mises en surpression. En outre, en cas d'incendie en galerie de liaison [MAVL](#), l'Andra indique que (i) les clapets coupe-feu situés à l'admission d'air et à l'extraction des alvéoles [MAVL](#) situées dans le compartiment en feu sont déclenchés avant la fermeture des portes de compartimentage et (ii) qu'après fermeture de ces portes, les trappes et registres situés à l'extrémité de la galerie de liaison sont fermés à leur tour. S'agissant des galeries d'accès [MAVL](#), l'Andra indique [39] que d'une part ces galeries ne nécessitent pas de compartimentage ni d'un système de ventilation spécifique, compte tenu de leur faible longueur et d'autre part que la gestion d'un incendie dans cette galerie est similaire à celle retenue dans la galerie de liaison, les trappes des galeries de liaison assurant l'extraction des fumées d'un incendie potentiel en galerie d'accès. Si les principes de gestion de la ventilation en situation d'incendie sont acceptables à ce stade, l'IRSN s'interroge sur la gestion de la ventilation en aval d'un compartiment dans lequel s'est développé un feu. En effet, la ventilation générale de l'installation souterraine est assurée par un système à l'extraction uniquement et l'apport d'air est réalisé en pleine section depuis la [ZSL](#). **Aussi l'IRSN attire l'attention sur l'importance de détailler, dans le dossier de [DAC](#), la gestion de la ventilation en situation d'incendie et notamment son incidence sur la ventilation dans l'ensemble de l'installation souterraine. Un cas particulier est constitué par la ventilation des alvéoles [MAVL](#) lors d'un incendie dans la galerie de liaison adjacente.** En outre, l'IRSN rappelle que l'Andra s'est engagée à présenter l'ensemble des principes de désenfumage retenus ainsi que la justification de l'efficacité de celui-ci (engagement 2010 E7.5 [1]).

En tout état de cause, s'agissant des descenderies, de la ZSL Exploitation et des galeries de liaison et d'accès, l'IRSN rappelle (cf. chapitre 7.1.2 du présent rapport) que celles-ci sont classées C1-I (c'est-à-dire sans filtration avant rejet) et souligne l'importance de la maîtrise du confinement en situation accidentelle et notamment l'importance du rôle de la hotte dans ce cas. Ce point fait l'objet des engagements E41-2017 et E34-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017 présentés respectivement ci-dessous et dans le chapitre 7.1.2 du présent rapport.

Pour ce qui concerne la gestion de la ventilation en situation d'incendie dans un alvéole MAVL, l'Andra retient [39], comme dans le dossier « Maîtrise des risques en exploitation », l'arrêt du soufflage avec la fermeture des clapets coupe-feu et le maintien de l'extraction jusqu'à atteinte d'un critère de température élevée, d'un seuil de colmatage ou en cas de détection de fumée en aval des filtres puis la mise en confinement statique de l'alvéole avec la fermeture du clapet coupe-feu à l'extraction de l'alvéole. L'Andra précise que la porte d'accostage et la porte blindée entre la cellule de manutention et la partie utile de l'alvéole seront fermées également. L'IRSN rappelle que l'Andra s'était engagée, à l'issue de l'instruction du dossier précité, à présenter, dans le DOS, les dispositions de maîtrise des relâchements de substances radioactives en provenance de la partie utile ou de la cellule de manutention des alvéoles MAVL en cas d'incendie (engagement 2014 E10). A cet égard, l'Andra a précisé au cours de l'instruction que « *la performance de la façade d'accostage vise la recherche d'une étanchéité la meilleure possible par l'utilisation de traversées et de calfeutrements EI 120 ([coupe-feu] 2h dans les 2 sens de feu) avec une étanchéité à froid et à chaud définie pour une pression de référence cohérente avec les feux envisagés et la présence de joints de confinement au niveau de l'accostage de la hotte* ». De plus, la conception des éléments de la façade sera approfondie afin de déterminer plus précisément le taux de fuite en lien avec les différentes traversées et la présence de joints. L'IRSN rappelle, comme indiqué au chapitre 7.1.2 relatif aux risques de dissémination, que la façade d'accostage entre la galerie d'accès et l'alvéole MAVL contient, outre la porte d'accostage, un sas pour la circulation du personnel et de matériel ainsi que des traversées pour la ventilation de l'alvéole. Ainsi, l'IRSN constate que la mise en confinement statique de l'alvéole repose sur l'efficacité et la disponibilité du système composé de la détection, de l'asservissement de la ventilation, de la fermeture des clapets et de l'ensemble des éléments de la façade d'accostage (capacité de confinement du sas personnel / matériel, du clapet coupe-feu, de la porte d'accostage...). Dans ces conditions, compte tenu de l'absence de filtration THE à l'extraction de l'ensemble des galeries de liaison du quartier MAVL, ces dispositions doivent répondre à des exigences fortes, avec une fiabilité et une disponibilité particulièrement élevées. Ainsi, l'IRSN estime que le taux de fuite retenu pour l'ensemble de la façade d'accostage, et notamment toutes ses traversées, doit être précisé et compatible avec la classe de confinement retenue pour les galeries d'accès et de retour d'air (classe C1, sans filtration avant rejet). A défaut, l'Andra devra considérer la mise en place de secteurs de confinement de part et d'autre du secteur de feu constitué par la cellule de manutention et la partie utile de l'alvéole MAVL. Enfin, compte tenu de ces exigences fortes, l'IRSN estime que les systèmes constitutifs du confinement des alvéoles MAVL (clapets coupe-feu au soufflage et à l'extraction, système de détection et asservissements) devraient être redondés, au titre de la défense en profondeur.

Aussi, en lieu et place de l'engagement 2014 E10, l'IRSN estime que, dans le dossier de [DAC](#), l'Andra devra :

- préciser et justifier, sur la base d'éléments existants, le taux de fuite retenu pour l'ensemble des éléments constituant la façade d'accostage entre la galerie d'accès et la cellule de manutention MAVL, en particulier au niveau des traversées, dans toutes les situations de fonctionnement,
- présenter un programme d'essais en vue de valider les performances de confinement de ces équipements rendant compte de situations tel un incendie dans un alvéole MAVL et de démontrer leur adéquation avec les exigences de conception associées aux scénarios de dimensionnement,
- évaluer les conséquences de situations d'incendie dans la partie utile de l'alvéole MAVL ou dans la cellule de manutention cumulées à la défaillance d'une disposition active de mise en confinement statique et démontrer l'adéquation des dispositions retenues pour le confinement. Le cas échéant, des dispositifs complémentaires seront présentés.

Ce point fait l'objet de l'engagement E41-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport et est lié à la recommandation R2 présentée au chapitre 7.2.1.7 suivant relatif au cas des enrobés bitumineux en alvéole MAVL.

En tout état de cause, l'IRSN considère que, pour les enrobés bitumineux, la démonstration de l'adéquation des performances de confinement de l'ensemble des éléments constituant la façade d'accostage avec la classe de confinement retenue pour les galeries sera très difficile à apporter et pose donc la question de la faisabilité du stockage en l'état des colis de boues bitumées, comme présenté dans le chapitre 7.2.1.7 ci-après.

7.2.1.7 Cas spécifique des enrobés bitumineux en alvéole MAVL

Pour rappel, les colis de boues bitumées sont issus du traitement dans les installations du [CEA](#) à Marcoule (STEL) et d'Areva à La Hague (STE2 et STE3) d'effluents radioactifs de diverses provenances, par ajouts de sels de co-précipitation puis bitumage des boues obtenues. Ces colis présentent un potentiel de déclenchement de réactions exothermiques en leur sein, par réactions d'oxydo-réduction entre sels ou par réactions sel/bitumes qui, à partir d'une certaine température, pourrait conduire à un échauffement par réactions exothermiques successives puis à un emballement de ces réactions entraînant à son tour une inflammation de la matrice bitumée du colis.

Compte tenu de l'enjeu de sûreté lié à un emballement de réactions exothermiques à l'intérieur de colis de déchets bitumés stockés en alvéole [MAVL](#) (relâchement important de matière radioactives hors de l'alvéole, voire un rejet vers l'environnement), les groupes permanents considéraient à l'issue de l'examen du « Dossier 2009 » (2010) [17] et du dossier « Maîtrise des risques en exploitation » (2014) [22], comme l'IRSN, que même dans le cas où un tel scénario pouvait être rendu très improbable, il devait néanmoins être envisagé dès la conception de l'installation afin de statuer sur l'opportunité de retenir des dispositions complémentaires pour maîtriser ses conséquences. A cet égard, l'ASN [23] a demandé à l'Andra de présenter, à l'échéance du [DOS](#), « *l'examen d'un scénario d'emballement de réactions exothermiques à l'intérieur de plusieurs colis* ».

En réponse à cette demande, l'Andra expose dans le [DOS](#) [39] sa stratégie de maîtrise des risques liés à l'incendie en alvéole [MAVL](#), qui repose sur la détermination d'un seuil de température permettant de garantir le maintien des performances de confinement des enrobés bitumineux ainsi que sur des mesures de prévention (limitation de la charge calorifique), de protection (qualification au feu des conteneurs de stockage) et de lutte contre un incendie (systèmes d'extinction embarqués asservis à des moyens de détection). Selon l'Andra, les enseignements du programme expérimental quadripartite Andra/Areva/[CEA/EDF](#) [236] concernant la réactivité thermique des boues

bitumées permettent de justifier la valeur de 180°C pour ce seuil, dérivée de la température de pyrolyse de la matrice bitumée, indépendamment des réactions exothermiques pouvant se produire en son sein. Les températures en fonctionnement normal de l'exploitation ne dépassant jamais cette valeur dans l'installation, une inflammation des enrobés bitumineux ne pourrait donc être envisagée qu'à la suite d'une agression thermique externe à un colis. Pour l'Andra, les dispositions qu'elle prévoit eu égard aux incendies garantissent le respect d'un tel critère en peau de colis primaire. Sur cette base, l'Andra exclut un scénario d'incendie non maîtrisé dans l'alvéole MAVL conduisant à l'inflammation d'un colis de stockage et sa propagation aux colis adjacents et ne le postule donc pas pour en étudier les conséquences.

Les éléments sur lesquels est fondée la stratégie retenue par l'Andra sont examinés ci-après. Les dispositions de limitation des conséquences d'un incendie sont ensuite analysées par l'IRSN au regard de l'hypothèse d'un incendie impliquant un ou plusieurs colis de stockage.

Valeur seuil de température permettant de garantir le maintien des performances de confinement des enrobés bitumineux

Le programme d'études quadripartite Andra/Areva/CEA/EDF [236], qui vise à compléter les connaissances sur le comportement des enrobés bitumineux lors d'une élévation de température, comprend notamment des essais à petite échelle (échantillons d'environ 500 mg) et à moyenne échelle (échantillons d'environ 2 kg).

S'agissant des essais à petite échelle [183][237][238], la réactivité thermique des enrobés bitumineux a été étudiée expérimentalement sur un ensemble de compositions variables (plus d'une centaine d'essais) représentatives des différentes familles d'enrobés CEA et Areva, par micro-calorimétrie (échauffement jusqu'à la température d'auto-inflammation du bitume pur qui est de 300°C, à une vitesse de 0,1°C/min). Sur cette base, des modèles correspondant à des lois de mélanges ont été établis pour chacune des familles d'enrobés, afin de caractériser la réactivité des enrobés en fonction de paramètres d'intérêt (comme l'exothermicité (J/g), les températures de début et de fin de réaction exothermique (°C) et la puissance libérée (mW/g)). L'exploitation mathématique de l'ensemble des résultats obtenus pour chaque famille a permis de calculer les valeurs centrées de ces paramètres d'intérêt, considérées comme représentatives de chaque famille, pour rendre compte de la réactivité.

L'étude à moyenne échelle [179][180][181] avait pour objectif d'observer les réactions exothermiques activées via un échauffement externe et leur capacité à déclencher un emballement thermique, localisé ou généralisé au sein de la matrice. Cette étude a consisté en la mise en œuvre et l'interprétation d'essais de montée en température par paliers jusqu'à 300°C sur une durée totale de 5,5 h, d'échantillons cylindriques de matrices bitumineuses de 2 kg, contenant des sels de compositions moyennes correspondant à celles des colis de boues bitumées du CEA et d'Areva. Aucun emballement thermique n'a été observé lors de ces essais, ni de sur-échauffement local au-delà de la température de consigne fixée en paroi du conteneur [179]. En outre, les résultats d'évolution locale de température collectés en différents points de chaque échantillon ont permis de conduire une modélisation des transferts thermiques [180] et de proposer une interprétation de propagation de chaleur induite par une réaction exothermique, initiée en paroi du cylindre.

Comme le programme n'a pas mis en évidence de seuil de température au-delà duquel un emballement de réactions exothermiques se produisait, l'Andra retient [39] la limite de 200°C correspondant à la pyrolyse du bitume pur et définit un seuil de température de 180°C, en appliquant une marge de 20°C, permettant de garantir le maintien des performances de confinement de la matrice bitumée.

L'examen par l'IRSN de ces essais à petite et moyenne échelles conduit aux mêmes conclusions que celles formulées à l'issue de la CSLUD sur la stratégie de gestion des déchets radioactifs anciens et de démantèlement de l'INBS du CEA de Marcoule (2016), qui ne concernaient que les échantillons représentatifs des colis d'enrobés bitumineux de la STEL de Marcoule.

Ainsi, l'IRSN constate une grande variabilité des résultats observés dans le cadre des essais à petite échelle et souligne la mention par le CEA de la faible qualité des thermogrammes obtenus. A cet égard, la température moyenne de démarrage des réactions exothermiques se situe aux environs de 120°C et un nombre significatif d'essais montrent que cette température peut être particulièrement basse (36°C pour la plus basse). Le CEA a indiqué, dans le cadre de l'instruction relative à la CSLUD mentionnée ci-avant, que les températures restituées pour le démarrage des réactions exothermiques correspondaient à la première détection d'un écart entre l'échantillon testé et la signature thermique d'un bitume pur (échantillon de référence), et non d'un réel démarrage de réactions. De ce fait, le CEA s'est engagé à ré-étudier l'ensemble des thermogrammes pour identifier exclusivement les réactions significatives et a indiqué qu'en première analyse, celles-ci se situent à une température supérieure à 200°C. Au cours de la présente instruction, le CEA a confirmé que cette étude complémentaire serait présentée fin 2017. **L'IRSN a estimé que cette nouvelle analyse des résultats consoliderait l'important travail déjà réalisé dans le cadre du programme quadripartite, en améliorant l'évaluation de la réactivité thermique des enrobés bitumineux et des quantités de chaleur délivrées par les réactions.**

Néanmoins, s'agissant de la capacité des réactions à déclencher un emballement, l'IRSN observait que les expériences à moyenne échelle avaient été réalisées sur des enrobés non vieillis par irradiation et que la modélisation qui en découlait ne considérait pas la microstructure d'un enrobé irradié. Or, l'irradiation interne des enrobés bitumineux entraîne la formation de bulles d'hydrogène menant à un gonflement de la matrice, phénomène constaté dans de nombreux colis d'enrobés bitumineux actuellement entreposés ; ces bulles de radiolyse peuvent avoir un effet adverse à une bonne conduction de la chaleur dans les enrobés. De plus, l'irradiation induit un durcissement de la matrice se traduisant par une hausse de sa viscosité, décalant vers les hautes températures ses points de changement d'état, ce qui retarde la mise en place d'un régime de transfert de chaleur convectif. **L'IRSN a donc estimé que la prise en compte de ces évolutions microstructurales sous auto-irradiation pouvait remettre en cause la représentativité et la modélisation des essais à moyenne échelle conduits sur des enrobés non irradiés.** A cet égard, le CEA a transmis fin 2016 un complément d'étude pour répondre à cette observation, conformément à l'engagement pris à l'issue de la CSLUD précitée ; ce complément n'a toutefois pas été versé par l'Andra dans le fond de dossier de la présente instruction.

De façon générale, s'agissant de la représentativité des échantillons d'enrobés étudiés vis-à-vis de l'inventaire réel de colis de déchets bitumés, l'IRSN rappelle qu'une proportion importante de colis de boues bitumées a été produite avant les années 1990 dans des conditions d'assurance de la qualité ne permettant de disposer d'une information fiable ni sur les conditions industrielles de leur production ni sur leur homogénéité. Sur ce dernier point, les fûts d'enrobés de la STEL de Marcoule sont par nature hétérogènes (accumulation de sels non enrobés, sédimentation de sels non solubles, présence de poches d'eau, reprise d'humidité par les enrobés et création de pores lors de l'intrusion d'eau par gonflement des sels...), ce dont ne peut pas rendre compte l'utilisation de faibles quantités d'enrobés (500 mg) fabriqués dans le programme d'études quadripartite. En tout état de cause, l'IRSN souligne que les programmes d'études pouvant être mis en œuvre sur ce sujet se heurtent systématiquement à la difficulté d'obtenir des échantillons et des données représentatives de la variété importante des caractéristiques des colis de déchets bitumés existants, au regard de l'historique de production et d'entreposage de ces colis ainsi que des

incertitudes inhérentes à l'évolution de leur composition chimique intrinsèque au cours des décennies passées et à venir.

Enfin, l'IRSN observe que le programme quadripartite s'intéresse à une agression thermique forte sur un colis de stockage, comme un incendie d'engin de manutention, mais pas au phénomène de reprise lente de réactions exothermiques qui pourrait prendre place après un tel incendie maîtrisé ou en situations de fonctionnement normal ou incidentel du stockage (arrêt de la ventilation, propagation d'énergie thermique depuis l'extérieur des alvéoles...). L'IRSN rappelle qu'il avait attiré l'attention, à l'issue de l'examen du dossier « Maîtrise des risques en exploitation » (2014) [21], sur le phénomène de reprise lente de réactions chimiques exothermiques qui pourrait conduire à élever progressivement la température jusqu'au seuil d'emballement de ces réactions. L'IRSN avait alors précisé qu'à cet égard, l'étude de la réactivité chimique des colis d'enrobés bitumineux devait tenir compte des hétérogénéités possibles dans ces colis, liées par exemple, au-delà des phénomènes précités dûs à l'auto-irradiation, à la sédimentation de sels non solubles (la viscosité du bitume décroît lorsque la température augmente). En outre, l'IRSN relève, comme présenté au chapitre 7.1.4, que l'Andra retient [55] un critère de température inférieure à 30°C dans les alvéoles MAVL contenant des enrobés bitumineux, afin notamment de limiter leur inhomogénéité en vue de rester dans le domaine de validité du modèle qu'elle utilise pour le relâchement de l'activité contenue dans ces colis en phase de post-fermeture. A cet égard, l'IRSN estime que le retour d'expérience des entreposages actuels de déchets bitumés pourrait être utilisé pour étayer sa démonstration dans la mesure où il n'a jusqu'à présent pas été mis en évidence de reprise de réactions exothermiques au-delà de la période de refroidissement des enrobés succédant à leur coulée dans des fûts, les principaux phénomènes constatés étant des gonflements d'enrobés attribués aux dégagements gazeux résultant de la radiolyse. Les températures maximales atteintes dans les entreposages au cours du temps pouvant certainement être de l'ordre de 40°C, il pourrait être opportun d'examiner, le cas échéant par des expertises de fûts réels, ce qui pourrait en être déduit pour une appréciation plus précise du risque d'emballement de réactions exothermiques pour des températures qui ne dépasseraient pas 40 à 50°C au niveau des colis primaires.

Malgré ce progrès possible, l'IRSN considère néanmoins que le programme d'études quadripartite n'est pas de nature, quels que soient les efforts consentis, à apporter la démonstration de l'absence d'emballement issu de la reprise de réactions exothermiques à des températures inférieures au seuil de 180°C retenu par l'Andra, pour l'ensemble de l'inventaire des enrobés bitumineux pendant toute la phase d'exploitation. En effet, la grande variabilité de cet inventaire ne rend pas accessible, par ce type de programme, la définition d'un seuil de température en dessous de laquelle un emballement de réactions exothermiques pourrait être raisonnablement qualifié de très improbable. L'IRSN estime que ceci met un poids d'autant plus fort sur la prévention et la lutte contre l'incendie dans cette stratégie.

Mesures de prévention et de lutte contre l'incendie

Comme indiqué précédemment, la stratégie retenue par l'Andra pour la maîtrise des risques liés à l'incendie en alvéole MAVL repose non seulement sur un critère de température permettant de garantir le maintien des performances de confinement (cf. supra) mais aussi sur des mesures de prévention (limitation de la charge calorifique), de protection (qualification au feu des conteneurs de stockage) et de lutte contre un incendie (systèmes d'extinction embarqués asservis à des moyens de détection).

L'IRSN relève avec satisfaction que l'Andra poursuit sa démarche de limitation de la charge calorifique en alvéole MAVL, initiée il y a plusieurs années. En particulier, le choix d'un pont stockeur pour la manutention des colis de boues bitumées dans la partie utile de l'alvéole MAVL, en lieu et place du chariot stockeur tel que prévu dans le

dossier « Maîtrise des risques en exploitation » (2014) [21], participe à la limitation des charges calorifiques. Néanmoins, les caractéristiques de la charge calorifique associée au pont stockeur, qui est la seule identifiée par l'Andra dans la partie utile d'un alvéole MAVL, ne sont pas détaillées au stade du DOS. A cet égard, l'IRSN souligne que l'Andra ne présente pas les dispositifs de surveillance qui seront mis en place dans les alvéoles MAVL et a fortiori leur contribution potentielle à la charge calorifique mobilisable en situation d'incendie. **L'IRSN n'est donc pas en mesure de se prononcer sur la représentativité du foyer (intensité et durée) retenu par l'Andra pour les essais de feu réel (cf. *infra*), vis-à-vis d'un incendie en partie utile d'un alvéole MAVL.**

S'agissant du comportement au feu des colis de stockage, le programme d'études quadripartite précité comporte des essais à échelle 1 mettant en jeu des conteneurs de stockage de type B2.1⁶⁴, afin notamment de caractériser la diffusion de la chaleur au sein du colis. Trois essais ont été réalisés sous un feu conventionnel selon la courbe ISO R834⁶⁵ [103] et deux autres sous un feu réel représentatif d'un incendie pouvant se dérouler dans Cigéo⁶⁶ [102]. L'Andra précise [39] que de nouveaux essais sous feu conventionnel ont également été réalisés sur des prototypes de colis CS4, dont les épaisseurs minimales de béton sont plus importantes que dans le cas du conteneur B2.1 (20 cm contre 10 à 12 cm). L'Andra a confirmé au cours de l'instruction que l'ensemble des résultats du programme quadripartite et des nouveaux essais de feu sur des prototypes de colis CS4 la conduisait à considérer « *qu'un incendie important à proximité immédiate d'un conteneur de stockage n'affecte pas le contenu de ce dernier, ni ne peut conduire à un échauffement suffisant pour provoquer un emballement de réactions exothermiques. La propagation de conteneur à conteneur est donc exclue* ».

Afin d'évaluer la pertinence de l'exclusion d'un incendie non maîtrisé dans l'alvéole MAVL conduisant à l'emballement de réactions exothermique dans un colis de stockage et sa propagation aux colis adjacents, l'IRSN a réalisé des calculs (cf. Annexe T13) (i) du temps d'atteinte d'une température maximale admissible au niveau d'un colis primaire pour un colis de stockage soumis à un flux thermique externe enveloppant (correspondant à une flamme à 927°C) et (ii) du délai de propagation d'une onde thermique d'un colis de stockage, où il est postulé la reprise de réactions exothermiques, vers un colis de stockage adjacent. Dans les deux études, les calculs ont consisté en une modélisation thermique réalisée avec le code CFD⁶⁷ ISIS de l'IRSN d'un conteneur de stockage de type B2.1 contenant des colis primaires d'enrobés bitumineux, en considérant des hypothèses simplificatrices comme (i) la non prise en compte des lames d'air (entre les colis primaires et entre les colis primaires et le conteneur de stockage), le mode de transmission de la chaleur étant uniquement la conduction thermique, (ii) des matériaux supposés avoir des caractéristiques homogènes et une géométrie des colis primaires et du conteneur de stockage inchangées au cours du temps et (iii) la non prise en compte de la liquéfaction et de l'ébullition du bitume. Les simulations d'un colis de stockage soumis à un flux externe enveloppant ont été menées, compte tenu des incertitudes sur la valeur de température de démarrage de réactions exothermiques pouvant conduire à un emballement évoquées ci-avant, en considérant plusieurs températures à ne pas dépasser en peau de colis primaire, par paliers de 50°C entre 50°C et 200°C. Les résultats des simulations réalisées sur un conteneur de type B2.1 sont

⁶⁴ Les conteneurs B2.1 étaient un des modèles retenus au stade de la fin d'esquisse pour les colis d'enrobés bitumineux. Ceux-ci ont été remplacés par les conteneurs de type CS4 au stade du DOS.

⁶⁵ Le feu conventionnel selon la courbe ISO R834 consiste en une élévation de la température du four au-dessus de la température ambiante pendant une heure selon la fonction suivante : $T = 345 \times \log_{10}(8t + 1) + 20$ où T (en °C) est la température du four à l'instant t (en min), soit, dans ce cas, l'atteinte d'une température de 945°C au bout d'une heure.

⁶⁶ Le foyer était constitué d'un bûcher de bois simulant l'incendie d'un chariot gerbeur, avec une puissance restituée de 1,3 MW pendant 50 minutes.

⁶⁷ CFD : computational fluid dynamics : mécanique des fluides numériques.

en accord avec les essais sous feu conventionnel selon la courbe ISO 834 réalisés par l'Andra [103] (cf. tableau 21). Ils montrent, comme ceux réalisés sur un conteneur CS4, que quelle que soit la valeur retenue pour la reprise des réactions, le délai d'atteinte de la température à ne pas dépasser en peau de colis primaire est de l'ordre d'une à deux heures (1h pour un critère de température de 50°C ou 2h30 pour un critère de température de 200°C). Compte tenu d'une part que la charge calorifique en partie utile d'un alvéole MAVL n'étant pas définie à ce stade, d'autre part que les durées de feu supérieures à l'heure ont été observées dans différents essais d'incendie d'équipements présentant des charges calorifiques a priori de même ordre de grandeur que celles associées à un pont stockeur ; l'hypothèse d'un incendie d'une durée similaire à ce délai doit être considérée. Ainsi, l'IRSN estime que le temps de réaction pour éteindre un incendie dans la partie utile de l'alvéole MAVL est de l'ordre de l'heure.

Critère de température (°C)		50	100	150	200
Simulations IRSN (conteneur B2.1)		-1h	-1h30	-2h	-2h30
Simulations IRSN (conteneur CS4)		-2h	-3h20	-4h50	-6h30
Résultats des essais à échelle 1 sous feu conventionnel [103]	Essai n° 1	-30 min ^a	-1h	-2h	N/A
	Essai n° 2	-1h ^a	< 2h55	N/D	N/A
	Essai n° 3	N/D	N/D	-2h*	N/A

^a : valeur déduite des courbes de température.

N/D : les éléments présentés dans les rapports d'essais ne permettent pas de déterminer cette valeur.

N/A : les températures en paroi de fûts n'ont jamais atteint 200°C dans les essais à échelle 1.

* : valeur issue du tableau présentant les températures maximales mesurées en paroi de fût et non de la courbe, celle-ci n'étant pas exploitable pour le capteur situé sur la paroi du fût.

Tableau 19 : Délais d'atteinte du critère de température en peau de fût

A cet égard, l'IRSN constate que la détection et l'extinction d'un incendie dans la partie utile de l'alvéole MAVL reposent sur des moyens embarqués sur le pont stockeur (non redondés) ; aucun dispositif fixe en ambiance n'est retenu dans cette partie de l'alvéole. Ces dispositions découlent des scénarios pris en compte par l'Andra pour la maîtrise des risques liés à l'incendie, basés sur le programme quadripartite, qui se limitent à ne considérer, comme conséquence possible de l'incendie, que la remise en suspension de la contamination surfacique des colis de stockage et, pour le scénario de dimensionnement du PUI, la mobilisation de 25 % du contenu d'un colis de stockage sans phénomène d'inflammation. L'Andra a en outre indiqué au cours de l'instruction que la partie utile des alvéoles MAVL ne pourrait pas être atteinte par les moyens d'extinction par ailleurs prévus dans l'installation souterraine (réseau incendie « humide »). L'IRSN rappelle également que l'intervention de personnel dans la partie utile (irradiante) n'est pas possible. Par conséquent, l'IRSN observe qu'en cas de défaillance des moyens de détection ou d'extinction embarqués, aucun autre moyen n'est disponible pour maîtriser un incendie. Compte tenu des réserves exprimées ci-avant sur les risques d'atteinte des seuils de déclenchement de réactions exothermiques, l'IRSN estime que les dispositions de détection et d'extinction ne sont pas suffisantes dans la partie utile de l'alvéole MAVL dans la mesure où elles ne permettent pas de garantir la maîtrise d'un incendie dans le délai de l'ordre de l'heure, en cas de défaillance d'un des systèmes.

Par ailleurs, dans les simulations réalisées par l'IRSN concernant le délai de propagation d'une onde thermique d'un colis de stockage vers un colis de stockage adjacent, un sous-volume (10 %) de bitume dans le conteneur de stockage « source » est initialisé à la température seuil d'emballage des réactions exothermiques (100°C ou 150°C,

conformément aux hypothèses utilisées dans les simulations précédentes). Les simulations sont poursuivies jusqu'à l'atteinte de cette température en peau d'au moins un des colis primaires du colis de stockage adjacent (colis cible). Les résultats de ces calculs indiquent que le délai de propagation d'un colis de stockage vers un colis adjacent est de l'ordre d'au plus quelques jours (environ 16 h en considérant un seuil de déclenchement de 100°C et à un peu plus de 2 jours en considérant 150°C). **Aussi, en l'absence d'une intervention relativement rapide dans l'alvéole, l'IRSN estime que la propagation d'un colis de stockage à un autre d'une onde thermique susceptible d'être à l'origine d'un emballement de réactions exothermiques ne peut pas être exclue.**

Dispositions de limitation des conséquences

L'IRSN rappelle que les dispositions de limitation des conséquences d'un incendie prévues par l'Andra sont dimensionnées, au stade du **DOS**, au regard de scénarios n'impliquant pas l'inflammation d'un enrobé bitumineux. L'examen des dispositions de limitation des rejets actuellement prévues par l'Andra, si l'évènement d'emballement redouté venait à se produire, appelle les deux remarques principales suivantes de l'IRSN.

En premier lieu, la stratégie de gestion de la ventilation en situation d'incendie retenue par l'Andra consiste à arrêter le soufflage (fermeture du clapet au soufflage) et à maintenir l'extraction tant que l'intégrité du niveau de filtration **THE** situé en aval aéraulique de chaque alvéole **MAVL** le permet. A cet égard, l'IRSN considère, comme à l'issue de son examen du dossier « Maîtrise des risques en exploitation » (2014) [21], que ce niveau de filtration est susceptible d'être colmaté de manière très rapide par les suies massives et grasses générées par un incendie d'enrobé bitumineux. Le passage en confinement statique de l'alvéole **MAVL** pourrait ainsi potentiellement intervenir avant la fin de l'incendie. Cette situation entraînerait alors une montée en pression liée à l'incendie susceptible d'inverser les sens d'écoulement d'air et entraîner des fuites vers la galerie d'accès d'une part et la galerie de retour d'air d'autre part. A cet égard, il convient de rappeler que la conception de l'Andra au stade du **DOS** ne prévoit aucun secteur de confinement capable de diriger ces fuites vers un autre niveau de filtration et qu'en cas de fuites de substances radioactives hors de l'alvéole **MAVL**, une contamination de l'installation et un rejet non filtré vers l'environnement ne peuvent donc être exclus. Comme présenté au chapitre 7.2.1.6, l'IRSN constate que la mise en confinement statique de l'alvéole repose sur l'efficacité et la disponibilité du système composé de la détection, l'asservissement de la ventilation, la fermeture des clapets et la capacité de confinement de l'ensemble des éléments de la façade d'accostage (sas personnel / matériel, clapet coupe-feu, porte d'accostage...).

Afin d'évaluer la surface de filtration **THE** nécessaire pour s'assurer de l'intégrité du niveau de filtration dans une telle situation, l'IRSN a réalisé des calculs basés sur la détermination du ratio entre la résistance aéraulique du filtre colmaté et la résistance aéraulique du filtre neuf (cf. Annexe T14). Ces calculs confirment que bien avant la combustion totale du contenu d'un seul colis primaire (estimée à environ 6 heures), et même en considérant que seules 20 % des suies produites sont effectivement déposées sur le niveau de filtration **THE**, la masse de suies produite par l'incendie est suffisante pour colmater rapidement un caisson de filtration **THE**, en 20 minutes environ. Il en résulte que la surface de filtration qui serait nécessaire pour conserver une efficacité du niveau de filtration à l'extraction de chaque alvéole serait de l'ordre de 560 m², ce qui correspond à une vingtaine de caissons de filtration **THE** en parallèle. A titre d'illustration, ce type d'équipement correspond aux besoins en filtration **THE** de l'usine MELOX de Marcoule qui possède l'une des plus importantes ventilations nucléaires des **INB** françaises. **Aussi, l'IRSN considère que la surface du niveau de filtration des alvéoles MAVL apparaît déraisonnable à dimensionner à un incendie mettant en jeu un colis d'enrobé bitumineux, dans la mesure où elle nécessiterait la mise en place de nombreux filtres THE en parallèle, configuration qui apparaît inadaptée à la gestion pratique de la**

ventilation dans un environnement souterrain. La maîtrise des rejets nécessite donc, pour un tel scénario, d'étudier un dispositif ultime de limitation des conséquences d'un incendie, situé en tête des liaisons surface-fond. A cet égard, la revue du **DOS** effectuée à l'automne 2016 par le groupe d'experts réunis par l'**AIEA** [8] suggère également de considérer l'utilisation d'un système de filtration pour l'air évacué des installations souterraines, en tant que mesure de défense en profondeur pour la limitation des rejets radioactifs en cas d'incident ou d'accident.

En second lieu, compte tenu des incertitudes sur les températures auxquelles les réactions exothermiques pourraient reprendre et mener à un emballement, l'Andra ne peut pas s'affranchir de vérifier l'état thermique du(des) colis après l'extinction du feu même si celui-ci est rapidement maîtrisé. A cet égard, les groupes permanents Déchets et Usines ont recommandé, à l'issue de l'instruction du dossier « Maîtrise des risques en exploitation » (2014 R1) [22], que l'Andra présente, dans le dossier accompagnant la **DAC**, les dispositions de surveillance pendant la phase d'exploitation et de réversibilité permettant notamment de détecter au plus tôt une montée progressive de température. Une telle surveillance devrait, selon l'IRSN, permettre de réagir avant qu'une évolution thermique menant à l'évènement redouté ne soit plus maîtrisable. Elle pourrait également contribuer à la gestion de l'accident (vérification de l'état thermique du(des) colis). En tout état de cause, une élévation de la température du colis affecté impose de prévoir une action corrective avant qu'elle puisse se propager à d'autres colis.

A cet égard, pour ce qui concerne la mise à l'état sûr de l'alvéole, l'IRSN considère, en première approche, que la conception actuelle ne permet pas un refroidissement efficace et durable des colis de stockage (faible espace libre dans l'alvéole, contraintes liées à l'utilisation d'eau). Des dispositions d'isolement des colis de stockage, qui peuvent inclure le retrait des colis potentiellement impactés, semblent quant à elles difficiles à mettre en œuvre, compte tenu de la configuration de remplissage retenue par l'Andra (remplissage de l'alvéole par lits), dans un délai compatible avec l'absence de propagation entre colis de stockage.

Aussi, l'IRSN considère que la conception des alvéoles MAVL n'est pas favorable à la mise en œuvre d'une intervention visant à s'assurer qu'une reprise et qu'une propagation de réactions exothermiques ne peuvent avoir lieu après un incendie.

En conclusion, si la qualité du programme expérimental quadripartite est reconnue par l'IRSN, les résultats qui en découlent ne permettent pas de justifier une valeur « seuil » de température fiable en deçà de laquelle tout risque d'emballement de réactions exothermiques dans les colis d'enrobés bitumineux est exclu, compte tenu de la variabilité des contenus des colis de déchets bitumés et de leurs évolutions possibles sur des durées de l'ordre de la centaine d'années. Il est par ailleurs peu vraisemblable que les compléments aujourd'hui en cours puissent résoudre cette difficulté. En outre, bien que les dispositions de maîtrise des risques liés à l'incendie dans un alvéole **MAVL** (prévention, détection, lutte contre l'incendie et retrait éventuel des colis impactés) retenues par l'Andra au stade du **DOS** présentent des améliorations significatives par rapport aux dossiers antérieurs, la possibilité d'un dimensionnement permettant d'exclure le risque d'emballement reste à ce jour incertaine. **L'IRSN appelle ainsi l'attention sur la fragilité de la stratégie de sûreté de l'Andra vis-à-vis des risques de démarrage de réactions exothermiques dans un alvéole MAVL menant à un emballement, en l'état actuel des connaissances sur les colis de déchets de boues bitumées et de la conception de l'alvéole.**

Compte tenu des enjeux de sûreté majeurs associés au stockage de déchets bitumés, l'IRSN estime donc qu'une stratégie de maîtrise « à la source » du risque d'emballement doit être évaluée de manière approfondie et qu'il est

indispensable à cet égard d'examiner la possibilité de mettre au point des procédés industrialisés permettant de transformer les déchets bitumés en déchets inertes (i.e. dont la réactivité a été neutralisée), voie déjà explorée depuis de nombreuses années et actée par le Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR). En effet, l'arrêté du 23 février 2017 établissant les prescriptions du PNGMDR sur la période 2016-2018 dispose de poursuivre les « études de recherche et développement relatives aux modes de traitement et de conditionnement des enrobés bituminés (FA-VL et MA-VL), combinant notamment des procédés chimiques et thermiques ». Cette logique fonde également la position exprimée par les groupes permanents « déchets » et « usines » [240] à l'issue de l'examen par l'IRSN [197] de la spécification de production du colis substitutif au bitumage pour le conditionnement des mêmes types de déchets issus de STE2, dénommé « colis C5 », et de son acceptabilité en stockage profond, selon laquelle un procédé visant à neutraliser la réactivité chimique du déchet en vue des étapes ultérieures de sa gestion devrait être retenu.

Néanmoins, le PNGMDR ne demande aux producteurs de déchets et à l'Andra de ne remettre « un rapport d'évaluation technique, économique et de sûreté comparant les différents modes de traitement et de conditionnement envisagés pour les déchets bitumés (stockage géologique et solutions alternatives) » qu'à l'échéance du 31 décembre 2019, date *a priori* ultérieure à celle du dépôt de DAC de Cigéo envisagé par l'Andra. Or l'IRSN constate que ce rapport regroupera les éléments clés de décision qui permettraient de confirmer ou non l'absence d'éléments rédhibitoires à la mise en œuvre de la neutralisation de la réactivité des déchets bitumés. Comme le dossier de DAC a vocation à présenter une unique option de référence pour ce qui concerne ce type de déchets, en vue de fonder une décision sur la création du stockage géologique, l'IRSN estime essentiel que les éléments de décision précités puissent être apportés au plus tard lors du dépôt du dossier de DAC.

Ainsi, l'IRSN estime qu'une solution de neutralisation de la réactivité des déchets bitumés en vue de leur stockage doit être privilégiée. Dans le cas où les éléments de décision précités comporteraient des aspects rédhibitoires quant à la mise en œuvre d'une telle solution, leur stockage en l'état ne pourrait être envisagée que si (i) une démonstration convaincante a été apportée que les accidents susceptibles de conduire à des rejets importants sont rendus extrêmement improbables avec un haut niveau de confiance, conformément aux principes de l'arrêté du 7 février 2012 [4] fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base et (ii) des dispositions de mitigation sont prévues pour limiter au mieux les rejets en cas d'accident afin qu'ils ne puissent conduire à des conséquences inacceptables pour les populations.

R2. En conséquence, l'IRSN recommande que l'Andra apporte, dans les meilleurs délais et en tout état de cause au plus tard lors du dépôt du dossier de DAC, un ensemble d'éléments permettant de statuer sur la possibilité de mettre en œuvre un procédé permettant la neutralisation de la réactivité des déchets bitumés préalablement à leur mise en stockage.

L'IRSN appelle l'attention sur le fait que si un tel procédé ne pouvait être mis en œuvre, des évolutions de conception majeures des alvéoles MAVL sont nécessaires par rapport à la conception présentée au stade du DOS, pour réduire au mieux les risques liés au stockage des déchets bitumés en l'état. De telles évolutions de conception et les études associées apparaissent difficilement compatibles avec l'échéancier actuellement retenu pour la remise du dossier de DAC.

7.2.2 EXPLOSION

7.2.2.1 Risque d'explosion lié à l'hydrogène de radiolyse en exploitation

L'Andra indique que le risque d'explosion lié à l'hydrogène de radiolyse provient de la présence de matières hydrogénées dans les colis de stockage MAVL, ceux-ci étant perméables aux gaz. Ce risque est écarté pour les colis de stockage HA, ceux-ci étant étanches par conception.

Ainsi, l'Andra se fixe comme objectif de maintenir des conditions d'ambiance toujours inférieures à (i) 25 % de la limite inférieure d'explosivité « LIE »⁶⁸ (soit 1 % en volume d'H₂) dans l'ensemble des installations en fonctionnement normal et dégradé et (ii) 75 % de la LIE (soit 3 % en volume d'H₂) en situations incidentelles et accidentelles.

En fonctionnement normal (*i.e.* lorsque la ventilation est en fonctionnement), l'Andra indique [39] que les premières évaluations montrent que les débits de ventilation prévus à la conception dans les locaux à risque sont nettement supérieurs aux débits minimaux permettant de garantir l'objectif précité. Elle précise que les locaux sont ventilés de manière à favoriser le brassage et la dilution des gaz de radiolyse afin d'évacuer les gaz de radiolyse et d'éviter la création de zones mortes, cette hypothèse servant de base à la définition des débits minimaux pour la ventilation des alvéoles MAVL. Elle a précisé, lors de l'instruction, que des simulations ont été réalisées sur une configuration enveloppe d'alvéole afin de valider les débits d'air en alvéole permettant de respecter les critères de concentration en gaz de radiolyse et que les études seraient poursuivies pour démontrer que l'évacuation des gaz de radiolyse est maîtrisée également pour un alvéole en cours de remplissage.

En cas d'arrêt du fonctionnement des systèmes de ventilation, l'Andra retient, dans ses évaluations, un débit de gaz de 40 L/colis de stockage/an et considère des locaux hermétiques avec le nombre maximal de colis de stockage. L'accumulation d'H₂ est supposée au droit de la zone contenant les sources d'émission sur une hauteur de 10 cm dans l'installation de surface et de 17 cm dans un alvéole MAVL. L'Andra a précisé au cours de l'instruction que ces hauteurs d'accumulation étaient retenues de manière forfaitaire et seraient consolidées pour la DAC. Dans le cas des hottes de transfert, l'Andra retient d'une part une accumulation homogène dans la hotte, d'autre part une stratification des gaz en partie supérieure. Les délais d'atteinte de 75 % de la LIE en fonction des locaux des installations de surface et souterraine, ainsi que dans la hotte lors du transfert des colis de stockage, sont présentés dans le Tableau 20.

⁶⁸ La LIE correspond à la concentration minimale d'un gaz dans l'air qui permet son inflammation et son explosion. Pour l'H₂ celle-ci est égale à 4 % en volume.

	local	Délai d'atteinte d'une concentration de 75 % de la LIE pour 40L/colis/an (en semaines) Entre parenthèses, pour 100L/colis/an
Installation de surface	Cellule de déchargement des ET-H	90
	Cellule de déchargement des ET-V	23 (9)
	Zone tampon des colis de stockage non confectionnés	46
	Zone tampon des colis de stockage confectionnés (côté ouest)	65
	Zone tampon des colis de stockage confectionnés (côté est)	51
Transfert des colis	Hotte de transfert (accumulation homogène)	32
	Hotte de transfert (accumulation en partie haute)	3 (9 jours)
Installation souterraine	Alvéoles MAVL	5 (2)

Tableau 20 - délai d'atteinte d'une concentration de 75 % de la LIE pour un débit de 40 L/colis de stockage/an (Andra, [39])

En outre, comme dans le dossier « Maîtrise des risques en exploitation », l'Andra envisage la possibilité d'accepter un nombre limité de colis de stockage dont la production d'hydrogène serait supérieure à 40 L/colis de stockage/an. Elle a précisé au cours de l'instruction que ces colis feraient l'objet d'une gestion au cas par cas avec la mise en place de mesures spécifiques, l'analyse de la prise en charge de ces colis et des dispositions à mettre en œuvre étant prévues pour la DAC. A cet égard, l'Andra présente en complément [39] des délais d'atteinte d'une concentration de 3 % de la LIE en considérant un débit de 100 L/colis de stockage/an. Ainsi les délais d'atteinte de cette concentration dans la cellule de déchargement des ET-V et dans un alvéole MAVL sont respectivement d'environ 9 et 2 semaines. Dans le cas de la hotte, ce délai est de l'ordre de 9 jours en cas d'accumulation en partie haute. En outre, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction qu'une disposition supplémentaire mobile est prévue en cas d'immobilisation prolongée de la hotte (« balayage à l'atmosphère » via deux orifices, l'un relié à un système d'air comprimé, l'autre à une pompe aspirante) et que la disponibilité dans les magasins sur site des pièces majeures de rechange permettra de réduire les temps d'intervention de façon à éviter l'atteinte d'une concentration de 75 % de la LIE. L'Andra considère [39] ainsi que, compte tenu des délais d'atteinte d'une concentration de 75 % de la LIE, le risque d'explosion lié à l'hydrogène produit par la radiolyse des colis de déchets est exclu. En outre, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que certains colis sont susceptibles de dégazer jusqu'à 300 L/colis primaire/an.

L'IRSN note que l'Andra exclut le scénario d'atteinte de la LIE dans la hotte suite à un arrêt du procédé de manutention des hottes conduisant à son immobilisation en se basant sur les dispositions de prévention cumulées que sont (i) la limitation de production d'hydrogène des colis primaires, (ii) la conception des engins de transfert et la mise en place de dispositifs pour gérer les cas de pannes ainsi que (iii) les orifices de balayages de la hotte (cf. Annexe T15). S'agissant de la première disposition, l'IRSN considère que celle-ci ne peut être effective dans tous les cas, car l'Andra se donne la possibilité de recevoir des colis dont le débit de production d'hydrogène est supérieur à la valeur retenue pour le dimensionnement des installations. En outre, le « balayage à l'atmosphère » via deux orifices sur la hotte nécessiterait une intervention humaine qui devrait être, dans ce cas, mise en place dans un délai inférieur à 9 jours ; cette disposition semble donc relever d'une ligne de défense « modérée » selon les critères de l'Andra (cf. chapitre 6.1). L'IRSN estime ainsi que, dans le cas d'un transfert de colis présentant un débit d'hydrogène supérieur à 40 L/colis de stockage/an, le scénario d'atteinte de la LIE dans la hotte ne peut pas être exclu à ce stade. Au cours de la réunion préparatoire, l'Andra a indiqué qu'une situation d'immobilisation de la

hotte pour une durée supérieure à celle nécessaire à l'atteinte de 75% de la LIE était actuellement à l'étude. En tout état de cause, l'IRSN souligne que la sélection des lignes de défense considérée pour l'établissement des scénarios, ainsi que la justification de leur disponibilité, sont fondamentales ; **elles devront être présentées dans le dossier de DAC.**

Aussi, l'IRSN estime qu'au stade du DOS, le scénario d'atteinte de la LIE dans une hotte suite à un arrêt du procédé de manutention conduisant à son immobilisation devrait être pris en compte par l'Andra, au titre du dimensionnement de l'installation, en vertu des critères qu'elle s'est elle-même imposés.

Par ailleurs, le scénario d'« atteinte de la LIE en alvéole MAVL » est exclu par l'Andra, sur la base de la valorisation des trois lignes de défense suivantes : (i) la conception d'alvéole MAVL « passante », pour laquelle elle estime l'« absence de mode commun d'interruption simultanée de l'entrée et de la sortie d'air », (ii) le rétablissement de la ventilation au regard des délais disponibles (2 ou 5 semaines selon le débit de production d'hydrogène des colis de stockage [39]) ainsi que, comme indiqué au cours de l'instruction, (iii) la présence de ventilateurs mobiles pour maintenir l'extraction de l'air. S'agissant de la qualification de ces lignes de défense, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que le dimensionnement du système de ventilation des alvéoles MAVL est basé sur la redondance des extracteurs, de leur alimentation électrique et du contrôle-commande ainsi que sur la ségrégation des équipements de ventilation, de leur alimentation électrique et du contrôle-commande. Elle précise que ce système est dimensionné au séisme et qu'il est implanté dans des locaux les protégeant des agressions d'origine externe. En tout état de cause, l'IRSN estime que l'exclusion *in fine* de ce scénario devra se baser sur la démonstration que les éventuelles agressions qui auront pu conduire à la perte de la ventilation des alvéoles MAVL ne pourraient en aucun cas causer la défaillance des moyens de la rétablir, à savoir des ventilateurs mobiles et des équipements qui leur sont nécessaires. L'IRSN estime donc que le scénario d'atteinte de la LIE dans les alvéoles MAVL ne peut être exclu sur la base de l'application seule de cette démarche.

Ainsi, l'IRSN estime qu'à ce stade de la conception de Cigéo, les éléments apportés par l'Andra ne satisfont pas encore à la partie de l'engagement 2010 E2.2 [1] relative à la justification des situations non retenues pour le dimensionnement de l'installation, et à la demande de l'ASN 2013 D8 [1] sur le même point.

L'IRSN rappelle qu'à l'échéance de la DAC, l'Andra devra préciser les dispositions permettant de s'assurer de l'efficacité du système de ventilation des alvéoles de déchets MAVL et à analyser les risques d'explosion dans les alvéoles et les galeries (demande 2011 R14 [1]). L'IRSN estime que cette demande reste d'actualité et considère que la justification de l'efficacité, de la fiabilité et de la disponibilité du système de ventilation eu égard aux risques d'explosion liés à la radiolyse doit être étendue à l'ensemble des zones de l'installation considérées par l'Andra comme « plus sensibles » au risque (cellule de déchargement, zones tampon, hottes et alvéoles MAVL). L'IRSN relève par ailleurs qu'à ce stade, l'Andra n'étudie pas les conséquences d'une explosion dans ces différentes zones.

En outre, l'IRSN rappelle que dans le cadre de l'instruction du « Dossier 2009 », l'Andra s'était engagée à clarifier sa démarche d'analyse des risques liés à l'explosion et à définir sur cette base les dispositions visant à les maîtriser et à en limiter les conséquences (engagement 2010 E8.1) [1], à justifier les durées maximales d'immobilisation et d'indisponibilité des systèmes de ventilation (engagement 2010 E8.2) [1] et à justifier le caractère enveloppe des situations à risque d'explosion dans un alvéole MAVL retenues pour le dimensionnement en considérant, le cas échéant, l'accumulation d'hydrogène dans l'alvéole en cas de panne prolongée de la ventilation (engagement 2010 E8.3) [1]. Si l'IRSN convient que l'Andra a consolidé sa démarche d'analyse du risque d'explosion lié à la

radiolyse et les options de sûreté visant à le maîtriser, la démonstration de l'exclusion des scénarios correspondants n'est toutefois pas achevée. Les engagements 2010 E8.1, 2010 E8.2 et 2010-E8.3 [1] restent donc à solder.

En vue de conforter les marges offertes par le dimensionnement des installations et les délais d'intervention, il conviendra que l'Andra justifie, dans l'ensemble des zones qualifiées « *plus sensibles* » des installations, l'exclusion d'un scénario d'explosion lié à la production d'hydrogène de radiolyse dans toutes les situations (normale, incidentelle et accidentelle) en considérant :

- la possibilité de recevoir des colis avec le débit de production d'hydrogène maximal connu ;
- la formation d'éventuelles zones ATEX localisées.

Dans le cas où cette justification ne pourrait pas être produite, il appartiendra à l'Andra d'évaluer les conséquences d'une explosion et, le cas échéant, de présenter les dispositions de surveillance, de prévention, de limitation des conséquences et/ou d'intervention retenues.

Pour ce qui concerne la surveillance des installations eu égard au risque d'explosion, l'Andra indique [39] qu'une surveillance de la concentration en hydrogène sera effectuée au niveau des filtres THE dans les alvéoles. Elle a précisé au cours de l'instruction que cette surveillance se fera « *en amont du filtre THE pour connaître le débit moyen d'hydrogène qui sort de l'alvéole* », que la technologie du capteur et ses performances n'étaient pas encore figée à ce stade et qu'« *il n'a pas encore été identifié la mise en place d'essais ou de simulations* ». L'IRSN estime qu'il est essentiel de vérifier les performances de cette surveillance, sa capacité à mesurer la concentration en hydrogène dans l'air extrait des alvéoles MAVL et la pertinence de cette mesure pour s'assurer que l'alvéole MAVL présente un volume d'H₂ inférieur à 25 % de la LIE. Compte tenu de la proximité de l'échéance de la DAC et des justifications non encore acquises à ce stade, l'IRSN appelle plus généralement l'attention sur la faible maturité du DOS vis-à-vis de la surveillance de l'installation (e.g. chapitre 7.1.2).

En outre, l'IRSN note que l'Andra ne prévoit pas de surveillance de la concentration en hydrogène dans les locaux de l'installation de surface qui accueilleront des colis (zones tampons, cellules de contrôle C5, de déconditionnement...). En effet, l'Andra indique [39] que seules des dispositions de surveillance sont mises en place afin de vérifier le fonctionnement de la ventilation (débits de ventilation). Elle ne présente pas non plus de disposition de prévention dans ces locaux.

Aussi, l'Andra devra présenter, dans le dossier de DAC, les dispositions retenues pour la prévention et la surveillance de formation d'une atmosphère explosive dans les locaux où les colis seront présents et justifier l'adéquation de ces dispositions aux scénarios envisagés. En particulier, l'Andra devra préciser les performances attendues pour la surveillance de la concentration d'hydrogène en sortie d'un alvéole MAVL et justifiera la faisabilité technique des dispositions retenues afin de détecter une concentration en hydrogène en cohérence avec le domaine de fonctionnement. Ce point fait l'objet de l'engagement E42-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

7.2.2.2 Risque d'explosion lié à l'hydrogène de radiolyse lors des opérations de fermeture et de réouverture des alvéoles MAVL

L'Andra prévoit [39], parmi les opérations préalables à la fermeture d'un alvéole MAVL, la mise en place d'un mur de blocs de béton en tête de partie utile de l'alvéole MAVL, entre la dernière rangée de colis et la porte de protection de la cellule de manutention, l'alvéole restant ventilée.

Au moment de l'obturation de l'alvéole, l'Andra retient [39] la mise en place de deux murs de béton, l'un étant mis en place au niveau du voile de la porte de radioprotection une fois celle-ci déposée, et l'autre à l'extrémité de la galerie de jonction de retour d'air, à proximité de la chicane de ventilation (cf. chapitres 2.5.2.2 et 7.1.1.3). La ventilation dans l'alvéole est arrêtée après cette opération. Puis l'Andra envisage soit d'inertiser l'alvéole soit de laisser en place un dispositif dans l'ouvrage de fermeture de l'alvéole MAVL afin de faciliter la remise en place d'une ventilation permettant l'évacuation de l'hydrogène lors d'une éventuelle réouverture. L'Andra a indiqué au cours de l'instruction que le détail du séquencage et les délais des opérations de fermeture des alvéoles étaient prévus pour la DAC. Elle a précisé qu'il était prévu à ce stade de retarder la fermeture des alvéoles MAVL en 2100 et de fermer en une seule opération tout le quartier MAVL ; d'une part, la fermeture tardive permettra de disposer, au moment de la fermeture, de colis produisant un moindre débit d'hydrogène de radiolyse, d'autre part, la fermeture de l'ensemble des alvéoles limitera la possibilité d'amener de l'air aux alvéoles en cours de remblaiement depuis les alvéoles non encore scellés et donc ventilés. Enfin, les résultats d'un programme de travail ayant pour objectifs (i) de caractériser le transitoire hydraulique / gaz dans les alvéoles MAVL non ventilés et d'identifier les situations pouvant conduire à l'apparition potentielle d'une atmosphère explosive, (ii) d'évaluer la performance de dispositifs d'inertage et (iii) d'identifier les caractéristiques d'une explosion afin d'évaluer le cas échéant la conséquence de l'explosion et les dispositions compensatoires, sont prévus à l'échéance de la DAC. **L'IRSN estime que les principes présentés par l'Andra sont satisfaisants au stade du DOS.**

Par ailleurs, l'Andra prévoit [39] qu'un dispositif de contrôle de l'atmosphère de l'alvéole MAVL puisse être installé sur le mur d'obturation côté galerie d'accès afin de faciliter sa caractérisation ultérieure. Elle précise que ce dispositif vise notamment à identifier d'éventuelles dispositions conservatoires en cas de décision de réouverture de l'alvéole. **L'IRSN estime que cette disposition est pertinente sur le principe. Toutefois, l'IRSN appelle l'attention sur le fait qu'un tel dispositif pourrait ne pas permettre de caractériser l'atmosphère de l'alvéole dans sa globalité.** Aussi il conviendra que l'Andra présente, dans le dossier de DAC, les dispositions nécessaires pour s'assurer de l'absence d'une zone ATEX dans l'alvéole MAVL en cas de réouverture.

7.2.2.3 Risque d'explosion lié à l'hydrogène de corrosion

L'Andra n'identifie pas, à ce stade, de source d'explosion dans les alvéoles HA [39]. Elle a indiqué au cours de l'instruction que « *la bride, qui recouvre la plaque d'accostage après chargement de l'alvéole, limite les échanges d'air entre l'alvéole et la galerie d'accès par l'intérieur de l'alvéole et permet de réaliser des prélèvements de gaz et de liquide dans l'alvéole. Elle permet également d'injecter le matériau de remplissage en tête d'alvéole lors de l'obturation et de mesurer la pression et la teneur en gaz (O₂,...)* dans l'alvéole ». En outre, elle a précisé qu'« *après la mise en place de la bride métallique, une fois les colis de stockage chargés dans l'alvéole, l'oxygène est consommé par corrosion en milieu oxydant sans produire d'hydrogène. La production d'hydrogène par corrosion anoxique se produit par définition une fois l'oxygène consommé* ». Le risque d'explosion liée à l'hydrogène produit par la corrosion en milieu anoxique est donc exclu par l'Andra.

L'IRSN observe que deux cas de figure pourraient se présenter. En premier lieu, si la bride rend l'alvéole étanche aux gaz, qu'il n'existe pas d'EDZ connectée à la galerie d'accès autour de l'alvéole ou que le matériau de remplissage bloque tout apport de gaz depuis la galerie d'accès, l'alvéole se trouve rapidement en contexte saturé et anoxique, condition dans laquelle la vitesse de corrosion est faible mais produit de l'hydrogène. Dans ce cas, d'après les estimations de l'IRSN, l'atmosphère de l'alvéole peut atteindre en quelques semaines une concentration en hydrogène supérieure à 4 %, ne permettant plus de réaliser d'opérations dans l'alvéole sans prendre un risque important, notamment si un apport soudain d'oxygène (défaillance de la bride...) survenait. En second lieu, si la bride n'est pas étanche et permet une légère entrée d'air dans l'alvéole depuis la galerie d'accès, le retour à des conditions anoxiques sera plus lent et la vitesse de corrosion des aciers plus importante. Il est en outre probable qu'une corrosion anoxique avec production d'hydrogène se produise en fond d'alvéole alors que de l'oxygène se trouve encore en entrée d'alvéole. Dans ce cas, l'IRSN ne peut exclure, en l'état actuel des connaissances sur le concept d'alvéole HA, l'existence d'une zone à l'intérieur de l'alvéole, où un mélange d'oxygène et d'hydrogène pourrait se produire, selon des conditions de cinétique que l'Andra n'a pas étudiées au stade du DOS.

Ainsi, l'IRSN estime que le choix final d'un concept, qu'il soit étanche ou non, devra s'appuyer sur des observations en conditions réelles, notamment par des expérimentations au Laboratoire souterrain (cf. conclusion au chapitre 5.4.1, relative à la construction d'un prototype d'alvéole HA pour la DAC) et une qualification précise de l'alvéole lors de sa construction.

En outre, l'IRSN observe que la surveillance de l'atmosphère des alvéoles HA se fera uniquement en entrée d'alvéole, au travers de la bride. Or, une telle mesure de la teneur en gaz peut poser un problème de représentativité de l'atmosphère de l'alvéole, compte tenu de sa longueur. En effet, une mesure en entrée d'alvéole ne permettra pas de garantir l'absence d'une coexistence d'hydrogène et d'oxygène dans un même alvéole, en particulier si la zone de mélange est éloignée de la tête de l'alvéole.

Aussi, l'IRSN estime que l'Andra devra présenter, dans le dossier de DAC, les éléments techniques en vue de conforter la maîtrise du risque d'explosion d'hydrogène produit par corrosion anoxique des aciers dans un alvéole HA et présentera la stratégie de surveillance de l'atmosphère des alvéoles HA et les premiers résultats des tests réalisés in situ au Laboratoire souterrain. Ce point fait l'objet de l'engagement E43-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

7.2.2.4 Autres risques d'explosion

L'Andra retient [39] comme origines du risque d'explosion sur les installations de Cigéo, autres que l'hydrogène de radiolyse des colis MAVL, l'hydrogène produit par les batteries des systèmes de transport à énergie et la présence de produits combustibles nécessaires pour certaines opérations. A ce stade, les opérations nécessitant des produits combustibles ne sont pas définies précisément, seule l'utilisation de bouteilles d'acétylène pour les soudures et de solvants organiques pour les besoins du laboratoire d'analyse ou du procédé d'exploitation sont envisagés par l'Andra.

L'Andra précise la localisation des locaux et des équipements pouvant présenter un risque d'explosion et notamment les locaux de recharge des batteries dans les recoupes techniques des descenderies et des produits combustibles dans la cellule de manutention des alvéoles MAVL. L'IRSN note que l'Andra n'identifie pas, parmi les sources potentielles d'explosion, les huit chaudières à gaz naturel prévues au niveau des installations de surface dans les

zones de descenderies et de puits [39]. Il conviendra, dans le dossier de **DAC**, que l'Andra inclue, parmi les sources d'explosion potentielles, ces chaudières de gaz naturel, si cette option est confirmée.

Concernant les options de sûreté retenues pour maîtriser le risque de formation d'ATEX, l'Andra retient [39] des mesures de prévention telles que la limitation des quantités des produits explosifs, le choix de produits en privilégiant les produits non ou peu explosifs, l'utilisation de batteries à recombinaison ou à faible dégagement d'hydrogène ou une ventilation permettant de limiter la concentration de vapeurs ou gaz combustibles en deçà des limites d'explosivité. Elle a précisé au cours de l'instruction que la principale disposition de limitation des conséquences était l'éloignement des zones à risques d'explosion par rapport aux cibles à protéger. En outre, l'Andra prévoit [39] des dispositions de surveillance, à savoir la mise en place de détecteurs d'hydrogène, notamment dans les locaux de recharge des batteries des engins, et le suivi des évolutions potentielles du zonage ATEX du site avec une mise à jour *a minima* annuelle du document relatif à la protection contre les risques d'explosion.

Sur le plan des principes, les dispositions présentées par l'Andra n'appellent pas de commentaire de la part de l'IRSN. Néanmoins, l'IRSN constate qu'au stade du **DOS**, l'Andra ne présente pas les dispositions concrètes visant à maîtriser le risque d'explosion tenant compte des différentes sources possibles d'explosion et des diverses situations de fonctionnement et notamment le cas d'un arrêt de la ventilation. A cet égard, l'IRSN rappelle que les engagements pris par l'Andra (2010 E8.1, 2010 E8.2 et 2010 E8.3 [1]) et la demande de l'ASN (2015 D7), concernant la définition de la démarche d'analyse des risques liés à l'explosion et la définition des scénarios retenus pour le dimensionnement de l'installation, s'appliquent également au risque d'explosion hors radiolyse. En outre, l'Andra s'est engagée (2010 E8.4 [1]) à justifier le lieu de charge des batteries des engins de manutention des alvéoles **MAVL** et, le cas échéant, l'absence de matériels ATEX dans la cellule de manutention des alvéoles **MAVL**. Même si des avancées sont relevées concernant la prise en compte de ce risque, aucun scénario n'a été formulé et aucune disposition n'est présentée à ce stade. **Ces engagements et demande restent donc à solder.**

7.2.3 TRANSPORT ET MANUTENTION DES COLIS

Les opérations de transport de colis de déchets en surface, en dehors des bâtiments et à l'intérieur du périmètre de **Cigéo** relèvent d'opérations de transport interne, en application de l'arrêté **INB** [4]. Ces opérations, ainsi que les opérations de manutention au sein des bâtiments de **Cigéo**, en surface et en profondeur, jusqu'à la mise en stockage des déchets (démarche d'analyse de l'Andra, mise en œuvre dans les locaux des installations de surface et souterraine, cas particulier du transfert des hottes dans les liaisons surface-fond et situations de fonctionnement associées) sont examinées successivement par l'IRSN dans le présent chapitre.

Pour rappel (cf. description des installations de surface de la zone descenderie au chapitre 2.2.1), l'Andra prévoit de construire l'installation de surface **EP1** en support au début de l'exploitation puis l'installation **EP2** vers 2070 pour la mise en stockage des colis **HA1/HA2**, non décrite à ce stade mais « *similaire à EP1 en termes de fonctionnalités et de risques* » [39].

7.2.3.1 Opérations de transport de colis de déchets en surface à l'extérieur des bâtiments

Transport voie publique

Les opérations de transport des emballages contenant des colis primaires depuis les installations d'entreposage jusqu'à Cigéo ne font pas l'objet du présent dossier. Ces opérations devront faire l'objet d'une démonstration de sûreté particulière préalablement à l'expédition des premiers colis, notamment à l'égard de la réglementation du transport sur voie publique. Les exigences qui découlent de cette réglementation visent notamment à permettre l'intervention sur un colis agressé, les agressions à considérer étant par ailleurs définies et standardisées en fonction des caractéristiques de la voie publique (maritime, routière, ferroviaire...).

Transport interne

Une fois les colis de déchets arrivés dans le périmètre de Cigéo, les opérations de transport interne en surface relèvent essentiellement de la réception des emballages de transport et de leur acheminement vers l'installation de surface. Des opérations d'expédition peuvent aussi être effectuées : l'Andra envisage de rares cas d'expédition vers la voie publique, par exemple pour des déchets d'exploitation de Cigéo ou pour des colis non conformes. Lors de l'acheminement des emballages de transport vers l'intérieur de l'installation de surface, les colis de déchets sont encore en configuration de transport sur la voie publique, donc munis de leurs capots amortisseurs (cf. Figure 26). Pour ces opérations, l'Andra n'envisage pas d'agression d'intensité supérieure à celles qui sont réglementairement prises en compte pour la démonstration de la sûreté du transport sur la voie publique en raison des caractéristiques de l'INB en surface et de ses environs. **Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.**

Conception de l'installation de surface en support aux opérations de transport interne

L'Andra ne prévoit aucune capacité d'entreposage tampon des emballages de transport en surface, chargés ou déchargés, à l'inverse [39] par exemple de zones tampon au sein des bâtiments de l'installation de surface pour les colis de stockage avant mise en hotte. A cet égard, l'Andra indique dans le PIGD [52] que la cadence de réception des colis de déchets devrait être d'environ 1 000 colis primaires par an. Selon le type de colis primaire et le type d'emballage de transport, ceci représente une cadence comprise entre une cinquantaine et plus de 800 emballages de transport par an, soit au maximum une quinzaine par semaine. L'Andra précise [39] que deux postes sont prévus pour le déchargement de chaque type d'emballage (deux postes pour les emballages verticaux et deux postes pour les emballages horizontaux). L'IRSN relève que le mode de réception des emballages considéré par l'Andra en « flux tendu », ne prend pas en compte d'éventuels aléas d'exploitation, par exemple liés aux opérations ou incidents au sein de l'installation EP1, qui pourraient empêcher la réception des emballages déjà expédiés dans les conditions de sûreté spécifiées.

Aussi, l'IRSN considère que l'Andra devra présenter, dans le dossier en support à la DAC, les dispositions de gestion de la réception d'emballages de transport dans Cigéo, en tenant compte des incertitudes relatives à l'arrivée des convois sur le centre et des situations de blocage envisageables dues aux aléas d'exploitation ou aux incidents dans l'installation de surface. Ce point fait l'objet de l'engagement E44-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

7.2.3.2 Opérations de manutention dans les installations

Dans sa démarche d'analyse des risques liés à la manutention, l'Andra décrit [39] les équipements de manutention ainsi que les risques associés retenus à ce stade de la conception, pour les installations de surface et souterraine ainsi que pour les liaisons surface-fond, et précise les vitesses maximales et les hauteurs de manutention. En outre, l'Andra présente les risques associés aux équipements de levage (portiques, ponts roulants et tables élévatrices), aux équipements de transfert guidé sur rails (par exemple, le chariot de transfert), au transfert incliné, aux équipements spécifiques (tables tournantes, pont stockeur, chariot stockeur, robot pousseur), aux accessoires tels que les palonniers, les grappins, les palettes de transfert ou encore les paniers de manutention, et enfin au blocage de la chaîne cinématique de manutention des colis. L'Andra a indiqué au cours de l'instruction retenir une approche déterministe pour analyser les risques de chute de charge, considérant tous les cas de chute de charge conduisant à une sortie du fonctionnement normal de l'installation. Elle précise par ailleurs que la fréquence d'utilisation des engins de manutention n'est pas prise en compte dans son analyse, ce qui lui permet par exemple de ne pas écarter a priori de défaillance d'engin de manutention sur la base d'une faible fréquence d'utilisation.

L'Andra analyse ces risques en considérant les cibles contenant des substances radioactives [39], à savoir les colis primaires et les colis de stockage. A cet égard, l'IRSN relève que certaines cibles de sûreté ne sont pas encore formellement identifiées à ce stade, comme par exemple le génie civil susceptible d'être agressé par la chute d'un colis de stockage d'une centaine de tonnes. L'Andra a indiqué au cours de l'instruction que l'intégration de l'ensemble des cibles de sûreté dans l'analyse des risques liés à la manutention a été engagée durant les phases de conception et qu'elle sera poursuivie. Enfin, l'Andra prévoit [39] que les hauteurs auxquelles seront manutentionnées les charges soient toutes inférieures à 4 mètres, à l'exception de certaines opérations en surface telles que la manutention des conteneurs de stockage vides, le chargement et le déchargement des emballages de transport de type **ET-V** ainsi que leur basculement en position verticale, pour lesquelles les charges pourront être déplacées jusqu'à 6 mètres de haut par rapport au plancher.

L'ensemble de ces éléments n'appelle pas de commentaire de la part de l'IRSN au stade du DOS.

S'agissant des opérations de transfert de hottes pleines dans l'installation souterraine, celles-ci ne relèvent pas formellement, selon l'Andra, d'opérations de transport interne. Toutefois, l'IRSN observe que certaines caractéristiques de ces transferts s'apparentent à celles d'opérations de transport sur la voie publique : les colis sont transportés à une vitesse spécifiée, sur des distances kilométriques et dans une hotte circulant à l'intérieur de locaux classés selon la norme ISO 17833 comme « *zone propre exempte, en condition normale de fonctionnement, de toute contamination radioactive, surfacique ou atmosphérique. Seul un faible niveau de contamination est accepté dans des circonstances exceptionnelles* ». L'Andra indique [39] en outre appuyer la démonstration de sûreté du transfert de la hotte sur l'atteinte de performances telles qu'un taux de fuite suffisamment bas pour respecter le classement précité (cf. chapitre 7.1.2.3 du présent rapport). L'IRSN estime que les exigences visées par l'Andra pour les opérations de transfert sont des plus conservatives puisqu'elles s'approchent de celles retenues pour les transports sur la voie publique.

L'IRSN observe que le pont stockeur et le chariot stockeur en alvéole **MAVL** ne figurent pas dans la liste préliminaire des **EIP** retenus par l'Andra à ce stade (cf. démarche de définition des **EIP** examinée par l'IRSN au chapitre 6.1.5). Or, l'IRSN constate qu'un grand nombre de moyens de manutention, en surface comme dans l'installation souterraine, sont à ce stade retenus comme **EIP** [39] (le pont portique dans le hall de déchargement des convois, les tables élévatrices de transfert des colis de stockage, les engins de transfert de colis, le transfert incliné...). A cet

égard, les équipements de manutention qui soulèvent les colis au-delà de leur hauteur de qualification sont inclus, au stade du **DOS**, dans la liste préliminaire d'EIP présentée par l'Andra. Elle a indiqué, au cours de la réunion préparatoire, qu'elle continuait le développement de cette liste et des exigences associées aux EIP en vue du dossier de DAC, notamment pour intégrer la gestion post-accidentelle, afin de déterminer les éventuelles exigences définies sur les moyens de manutention en alvéole MAVL et leurs fonctions supports. Elle a précisé qu'il apparaissait, à ce stade, très probable que le moyen de manutention dans l'alvéole MAVL (pont ou chariot stockeur) constitue *in fine* un EIP, auquel seront associées des exigences définies en matière de risques liés notamment à l'incendie. **Compte tenu de la prépondérance du procédé de manutention dans l'exploitation de Cigéo (nombre de transfert, distances...) et des risques identifiés dans l'alvéole MAVL, l'IRSN estime effectivement très probable que ce moyen de manutention nécessite un classement EIP.**

Application de la démarche dans les bâtiments de l'installation de surface et dans l'installation souterraine

L'Andra a indiqué au cours de l'instruction retenir des dispositions d'exploitation visant à prévenir le risque de chute de charge, telles que, dans la mesure du possible, le dimensionnement au séisme de niveau **SMS** de tous les engins de manutention de l'installation de surface transférant des charges sensibles (colis de déchets ou une charge pouvant aggraver un **EIP** ou un autre colis de déchets). Dans le cas où un tel dimensionnement n'est pas possible, par exemple pour certains ponts, l'Andra indique avoir vérifié qu'ils ne sont pas susceptibles d'aggraver un **EIP** non redondé et que le plancher des locaux dans lesquels ces ponts se situent résiste à leur chute ; elle envisage également d'équiper les ponts roulants de manutention de systèmes anti-soulèvement et anti-déraillement. En outre, l'Andra prévoit [39] de munir les moyens de manutention, en surface et en souterrain (i) de capteurs de vitesse, (ii) de capteurs anticollision et de capteurs de fins de course afin de « *surveiller la survenue de défaillances conduisant l'installation en situation dégradée* », et pour ceux spécifiquement sur rails, (iii) de freins de service et de freins de secours, redondés, asservis à des dispositifs d'arrêt automatique sur détection d'anomalie (survitesse, obstacle...) et dimensionnés de manière à ce que la distance d'arrêt soit compatible avec la détection et induise une décélération maximale compatible avec le dimensionnement du système de verrouillage de la charge. Dans le détail, les chariots de transfert de colis seront équipés de barrières anti-basculement (« drageoir » ou « réhausse ») et la hauteur de levage du pont stockeur et des tables élévatrices (cf. chapitre 2.6.3) de la cellule de manutention des alvéoles **MAVL**, munies de capteurs de position pour limiter le risque de mauvais alignement, sera limitée à environ 30 cm. Enfin, pour l'installation souterraine, l'Andra retient un dispositif de cantonnement de l'alimentation électrique des voies de circulation, visant à prévenir le mouvement simultané de deux chariots ou de deux navettes au sein d'un même secteur, défini par la zone entre deux tables tournantes. L'IRSN relève que l'Andra retient les mêmes principes de prévention des risques liés à la manutention que dans le dossier « Maîtrise des risques en exploitation » [21] et qu'elle a poursuivi la déclinaison de ces principes jusque dans le choix de dispositions précises de maîtrise des risques liés à la manutention. **L'IRSN estime que l'ensemble des dispositions prévues par l'Andra va dans le sens d'une bonne maîtrise des risques liés à la manutention.**

Afin de prévenir les risques de blocage de la chaîne cinématique de transfert des colis, l'Andra prévoit [39] de mettre en place un programme de maintenance préventive des équipements et ajoute qu'un programme d'essais avant la mise en service permettra de vérifier le fonctionnement des équipements de manutention, notamment au niveau des interfaces entre eux, ainsi que pour le mode dégradé de fonctionnement. Elle prévoit une « *fiabilité d'alimentation électrique adaptée* » pour les équipements « *impliquant un risque de blocage* ». S'agissant plus particulièrement des alvéoles **HA**, le corps du conteneur est conçu avec des patins en céramique, comme précisé au

chapitre 2.3, afin d'éviter un contact direct acier/acier entre le colis de stockage et le chemisage des alvéoles et ainsi faciliter le glissement du colis de stockage. **L'IRSN estime que ces dispositions sont, sur le principe, acceptables au stade du DOS.**

S'agissant de la surveillance, l'Andra indique d'une part [39] qu'elle prévoit un programme de surveillance des équipements de manutention, d'autre part que les opérations de manutention seront supervisées depuis la salle de conduite au moyen de systèmes de transmission vidéo installés tout au long du procédé. **Ceci est satisfaisant.** L'IRSN souligne toutefois que le retour d'expérience montre que la surveillance vidéo peut s'avérer inefficace à détecter certains dysfonctionnements du procédé, notamment si le système associé ne permet pas de distinguer le détail des objets (présence de fumée...). **Aussi, l'IRSN appelle l'attention sur la nécessité que les systèmes de surveillance vidéo soient conçus pour transmettre aux opérateurs en salle de conduite suffisamment de détails sur l'état des engins de manutention pour pouvoir détecter des dysfonctionnements même mineurs, dans le but d'apporter les éléments nécessaires à l'identification de la situation de fonctionnement et à une éventuelle intervention rapide.**

L'Andra retient [39] par ailleurs des dispositions visant à limiter les conséquences d'une éventuelle chute, telles que la manutention des colis à faible hauteur, à faible vitesse, l'absence de mouvement combiné et l'interdiction autant que possible de survol des cibles de sûreté. L'Andra indique en outre que, dans l'installation EP1, il n'est pas prévu de superposition de cellules sur plusieurs niveaux sauf pour la « cellule blindée de déchargement », constituée des cellules de déchargement des emballages de transport verticaux, de contrôle « C5 » et de mise en conteneur de stockage, dans laquelle sont manutentionnés des colis primaires et pour laquelle l'Andra précise que le plancher est dimensionné de manière à éviter toute chute traversante. Plus généralement, l'Andra indique [39] que le dimensionnement des infrastructures de l'installation de surface ainsi que celui du génie civil des alvéoles MAVL prennent en compte la chute d'une charge lourde. De surcroît, l'Andra prévoit, à certains endroits en surface et en souterrain, d'installer des éléments visant à amortir les chocs, tels que des vérins amortisseurs entre les hottes et les chariots de transfert et un « *dispositif amortisseur* » au fond du hall de déchargement de l'installation de surface et de la cellule de manutention des alvéoles MAVL.

S'agissant en particulier des opérations de manutention dans le hall de déchargement dans l'installation de surface, l'Andra considère [39] que les emballages de type B sont qualifiés, dans le cadre de la réglementation dédiée au transport sur voie publique, à une chute de 9 mètres de haut sur une surface plane, aussi les situations où un emballage subirait une chute dans ce local n'aboutiraient-elles pas à rompre son confinement. D'après le retour d'expérience issu d'autres installations nucléaires, l'IRSN relève que, en pratique, la démonstration de sûreté de certaines opérations de manutention peut s'appuyer sur les dossiers de sûreté des modèles d'emballages de transport, dans le cas où (i) ces modèles sont qualifiés aux épreuves représentatives des conditions accidentelles de transport et (ii) la configuration des emballages dans le hall de déchargement est conforme à celle lors du transport sur la voie publique. **Moyennant la prise en compte de ces deux points, l'IRSN convient du bien fondé de la démarche de l'Andra.** Pour les colis de type A reçus au sein de Cigéo, dont la conformité à la réglementation des transports sur la voie publique ne s'appuie pas sur de telles qualifications, l'Andra indique [39] pouvoir asseoir la démonstration de sûreté des opérations de manutention dans le hall de déchargement sur d'autres considérations telles que la qualification des colis primaires à une chute, **ce dont l'IRSN convient.**

S'agissant enfin du dimensionnement des hottes aux efforts mécaniques, l'Andra indique [39] d'une part que les hottes sont dimensionnées à une décélération de 1g, d'autre part que les équipements de transfert et la

solidarisation de l'ensemble rail/équipement/charge sont dimensionnés aux efforts impliqués dans une collision. L'Andra indique également la présence de dispositifs de calage dans la hotte MAVL pour maintenir les colis en position stable et ainsi les préserver en cas de collision ou d'arrêt brutal des engins de transfert.

L'IRSN considère, de manière générale, que l'ensemble des éléments découlant de l'application de la démarche d'analyse des risques liés à la manutention dans les bâtiments de l'installation de surface et l'installation souterraine est conforme aux bonnes pratiques. Ceci est satisfaisant au stade du DOS.

Application de la démarche au cas particulier des opérations de transfert des hottes dans les liaisons surface-fond

Le transfert des hottes chargées de colis de déchets, depuis l'installation de surface jusque dans l'installation souterraine, est réalisé au moyen d'un funiculaire ou « transfert incliné » (cf. description au chapitre 2.2.1.2, notamment Figure 33 bas).

Ainsi que détaillé par l'Andra [39] et décrit au chapitre 2.6.2 du présent rapport, ce véhicule, tracté par un câble, circule sur des rails. L'Andra a précisé au cours de l'instruction qu'elle prévoit que ce câble soit être constitué de fils tressés ou tournés.

Le chargement et le déchargement d'une hotte contenant un colis de stockage sur le transfert incliné peuvent être réalisés d'après l'Andra [39] au niveau de la gare haute et au niveau de la gare basse. En gare haute, dans le cas d'opérations de chargement, une navette de transfert de surface se déplace sur des rails jusque sur le transfert incliné pour déposer ladite hotte. Celle-ci est solidarisée au transfert incliné par un système de quatre verrouillages, un pour chaque pied de la hotte. Une fois arrivé en gare basse, le chariot de transfert se déplace jusque sous la hotte et la soulève pour ensuite entamer son transfert au sein de l'installation souterraine. Une hotte vide provenant d'un cycle de stockage précédent est alors chargée en lieu et place de la hotte pleine sur le transfert incliné en vue de la remonter dans l'installation de surface. En cas de panne, l'Andra prévoit des dispositions afin de terminer le cycle de manutention du transfert incliné sans toutefois les détailler au stade du DOS. Enfin, une fosse de maintenance est prévue [39] en gare haute pour réaliser « *certaines contrôles et opérations de maintenance courants* » sur le transfert incliné. Par ailleurs, l'Andra indique qu'un véhicule de montage est utilisé pour la maintenance de la gare basse, en précisant qu'un bras de grue peut être monté sur ce véhicule notamment pour les opérations de maintenance sur la voie.

L'Andra indique [39] considérer les opérations de chargement et de déchargement du transfert incliné comme des opérations « *sensibles* » qui font l'objet d'une automatisation. Pour ce qui concerne l'arrimage de la hotte sur le funiculaire, elle précise que le système de verrouillage précité est dimensionné pour résister d'une part aux décélérations maximales du véhicule, d'autre part aux sollicitations sismiques correspondant à l'aléa de niveau SMS. Par ailleurs, l'Andra présente des dispositions de prévention des risques liés à la manutention fondées sur la conception du transfert incliné : le freinage de la machinerie des poulies est assuré par des freins de service et des freins de secours et en cas de dysfonctionnement du freinage de la machinerie, le freinage du véhicule est assuré par deux types de freins dits « à sécurité positive » indépendants du freinage de la machinerie, le frein d'arrêt d'urgence et le frein d'arrêt d'ultime secours. L'Andra précise à cet égard que les freins et l'ensemble des équipements électriques du transfert incliné sont alimentés par un réseau de batteries embarquées, permettant une autonomie en énergie du véhicule durant 12h. En outre, l'Andra prévoit une surveillance particulière du transfert incliné, en attestent deux systèmes indépendants de mesure de sa vitesse, des capteurs dédiés à la mesure de la

tension du câble et enfin un contrôle régulier de l'état du câble. Pour ce qui concerne les dispositions de limitation de conséquences en cas de chute du transfert en descenderie, l'Andra prévoit en gare basse de la descenderie colis des butoirs amortisseurs. **L'IRSN constate les efforts substantiels consentis par l'Andra pour associer aux moyens de manutention en descenderie colis des dispositions de sûreté particulièrement nombreuses et diversifiées, qui se basent sur l'état de l'art en matière de remontées mécaniques. Ceci est satisfaisant.**

Situations de fonctionnement

De manière générale, les situations de fonctionnement retenues par l'Andra pour différents risques sont récapitulées selon leur classement (cf. Annexe T15). S'agissant des situations incidentelles liées à la manutention, l'Andra retient [39] quatre scénarios de chute et de collision, en surface et dans l'installation souterraine. Parmi ceux-ci, la chute d'un emballage de transport (à déchargement vertical ou horizontal) de type A de 2 mètres de haut dans le hall de déchargement des emballages est estimée enveloppe par l'Andra en termes de conséquences radiologiques pour le public.

S'agissant des situations accidentelles de dimensionnement de l'installation, l'Andra en retient deux catégories, selon qu'elles se déroulent dans l'installation de surface ou dans l'installation souterraine et, de la même manière que pour les situations incidentelles, elle ne procède à l'estimation des conséquences radiologiques de ces scénarios que pour les scénarios estimés enveloppes des autres (cf. chapitre 6.1.3.2 relatif à la démarche de sûreté en exploitation). Pour la première catégorie, l'Andra retient cinq scénarios d'accidents liés à la manutention (chute et collision) dans plusieurs locaux, dont le plus pénalisant est la chute d'un colis primaire sur un autre colis primaire, d'une hauteur de 6 mètres de haut, lors de son déchargement hors de l'emballage de transport. Pour la seconde catégorie, à savoir les situations retenues pour l'installation souterraine, l'Andra présente trois situations. A cet égard, celles-ci n'appellent pas de commentaire de la part de l'IRSN au stade du **DOS**. Toutefois, l'Andra considère que la chute d'un colis de stockage **MAVL**, d'une hauteur supérieure à sa hauteur de qualification, en cellule de manutention de l'alvéole est la plus pénalisante. L'IRSN constate que l'Andra ne présente pas de scénario relatif à la chute d'un colis en partie utile d'un alvéole **MAVL**. A cet égard, l'IRSN rappelle la demande de l'ASN 2011 R15 [1] émise à l'issue de l'examen du « Dossier 2009 », de définir les dispositions permettant de remédier à la situation résultant de la chute d'un colis de déchets **MAVL** lors de sa mise en place dans un alvéole. **L'IRSN estime que cette demande est toujours d'actualité.**

S'agissant des situations accidentelles de dimensionnement du **PUI**, l'Andra retient cinq situations associées aux risques liés à la manutention (trois pour l'installation de surface et deux pour l'installation souterraine).

Nonobstant les remarques faites au chapitre 6.1 du présent rapport dédié à la démarche de sûreté en exploitation à l'égard des scénarios retenus pour le dimensionnement de l'installation et de son **PUI, ces éléments n'appellent pas de commentaire de la part de l'IRSN au stade du **DOS**.**

Par ailleurs, l'Andra considère certaines situations comme « *physiquement impossibles* » ou bien prévoit une succession de dispositions de prévention robustes permettant de les exclure. Ainsi, s'agissant des risques liés à la manutention, l'Andra exclut les quatre situations accidentelles suivantes :

- collision ou chute, en gare haute ou basse du transfert incliné, de la navette de surface ou du chariot de fond sans la présence du transfert incliné ;
- emballement du transfert incliné suite à une défaillance matérielle en gare haute, sans déclenchement de tous les systèmes de freinage, conduisant à une collision à grande vitesse en gare basse ;

- basculement d'une hotte, transportée sur le transfert incliné, suite à un déclenchement intempestif du système de freinage ou un déraillement ;
- atteinte de la LIE dans la hotte suite à un arrêt du procédé de manutention des hottes conduisant à son immobilisation.

En vue d'exclure le premier scénario, l'Andra indique qu'un inter-verrouillage entre l'alimentation des voies et la détection de la présence de la navette ou du chariot rend physiquement impossible l'approche de la navette en l'absence du transfert incliné. L'IRSN note que les éléments apportés par l'Andra visant à exclure ce scénario relèvent des dispositions de conception du contrôle-commande associé aux déplacements de la navette de surface et du transfert incliné. Ils ne peuvent constituer une justification du caractère physiquement impossible du scénario considéré. **Dans ces conditions, l'IRSN considère que l'Andra devrait procéder à l'identification des lignes de défense et à la caractérisation de leur disponibilité, sur la base d'éléments détaillés de conception, en vue de justifier l'exclusion de ce scénario, et non viser son exclusion *a priori*.**

S'agissant de l'exclusion de la deuxième situation, l'Andra s'appuie sur la conception du câble (cf. ci-dessus) retenant le transfert incliné, sur la présence de différents systèmes de freins indépendants, associés au transfert incliné lui-même mais également à la machinerie de traction en gare haute, ces derniers étant déclenchés de manière automatique, et enfin sur un contrôle commande redondé pour exclure cette situation. L'IRSN relève que, s'agissant des scénarios impliquant le transfert incliné, l'Andra retient d'une part la collision du transfert incliné en gare basse de la descenderie comme situation accidentelle de dimensionnement, d'autre part cette même collision cumulée avec la défaillance des butoirs amortisseurs en gare basse comme situation de dimensionnement du PUI. L'Andra prend toutefois l'hypothèse, pour ces scénarios, d'une « *petite vitesse* » acquise par le transfert incliné au moment de la collision. L'exclusion du scénario d'emballlement du transfert incliné, c'est-à-dire le scénario de collision « à haute vitesse » de ce transfert, est fondée sur la considération par l'Andra de dispositions de conception rappelées ci-dessus. **Comme précédemment, l'IRSN estime que l'exclusion de ce scénario ne peut pas être prononcée *a priori*.**

Ainsi, l'Andra devra justifier, dans le dossier de DAC, le caractère pénalisant des scénarios de collision du transfert incliné en gare basse de la descenderie, pris en compte parmi les situations de dimensionnement de l'installation ou de son PUI. Ce point fait l'objet de l'engagement E45-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

En outre, l'IRSN relève que l'Andra n'a pas prévu de dimensionner le transfert incliné à un séisme d'intensité supérieure au SMS, dont l'occurrence est pourtant prévue d'être retenue à la DAC en tant que situation de dimensionnement du PUI. **L'IRSN estime que l'Andra devra alors mettre en cohérence les scénarios de collision du transfert incliné en gare basse vis-à-vis de son comportement au séisme (cf. chapitre 7.3.1.2).**

L'IRSN observe que si l'Andra a évalué les conséquences radiologiques du scénario de dimensionnement du PUI (même type de collision cumulé à la défaillance des butoirs amortisseurs en gare basse), elle ne présente pas à ce stade de disposition permettant de remédier à une telle collision (reprise de la hotte ayant chuté, récupération du colis contenu dans la hotte, opérations de réparation...). Or, au vu notamment du risque d'accumulation d'hydrogène dans la hotte de manutention de colis de stockage MAVL (cf. chapitre 7.2.2.1 ci-dessus), l'IRSN estime que de telles dispositions peuvent s'avérer indispensables à la gestion sûre de la situation post-accidentelle correspondant à une telle collision. L'Andra a précisé au cours de la réunion préparatoire à la réunion des groupes permanents qu'elle présentera, à l'échéance de la DAC, la gestion post-accidentelle, en complément des situations

accidentelles de dimensionnement du PUI. **L'IRSN considère qu'il conviendra alors d'examiner ces situations notamment au regard du risque d'accumulation d'hydrogène dans la hotte immobilisée.**

L'Andra considère que le troisième scénario, le basculement de la hotte dans la descenderie, relève d'une impossibilité physique puisque les hottes n'ont pas assez d'espace en descenderie colis pour réellement basculer, l'espace étant occupé à la fois par la hotte elle-même et par le transfert incliné. L'Andra retient en outre la redondance du verrouillage des hottes, par ses quatre pieds, sur le transfert incliné, comme ligne de défense supplémentaire. Elle a ajouté au cours de l'instruction que deux capteurs indépendants par pied de hotte contrôlent la fermeture de leur verrouillage sur le transfert incliné et que les actionneurs responsables de ce verrouillage ne sont alimentés qu'en gare haute ou basse. L'IRSN convient que les dispositions de conception de l'Andra sont, sur le principe, de nature à pouvoir exclure le basculement de la hotte en cas de freinage brutal du transfert incliné. L'IRSN souligne toutefois qu'un tel freinage pourrait induire des dégradations du transfert incliné conduisant à son possible blocage (panne, dégradation physique de matériel...). A cet égard, l'Andra indique [39] prévoir des dispositions afin de terminer le cycle de transfert. **Il conviendra que l'Andra présente ces dispositions dans le dossier de DAC.**

Plus généralement, pour ce qui concerne l'exclusion du scénario d'atteinte de la LIE dans la hotte suite à un arrêt du procédé de manutention, l'Andra précise appuyer sa démonstration sur les lignes de défense suivantes : la limitation de la production d'hydrogène des colis primaires, la conception des engins de transfert et la présence des orifices de balayage de la hotte. L'IRSN rappelle que les lignes de défense retenues et en particulier la robustesse que l'Andra leur attribue - éléments présentés au cours de l'instruction et examinés au chapitre 7.2.2.1 du présent rapport - **ne permettent pas à ce stade d'exclure ce scénario.**

S'agissant des scénarios de blocage de la chaîne cinématique, c'est-à-dire d'arrêt non prévu de l'opération de manutention en cours suite à un incident ou une panne associé à l'impossibilité de rétablir la chaîne cinématique pendant une certaine durée, sans pour autant que sa cause soit nécessairement imputable à une situation accidentelle, l'IRSN a souligné lors d'instructions précédentes les caractéristiques particulières de l'installation de stockage (linéaire de galeries, procédé principal séquentiel de transfert de colis...) et le besoin de limiter les conséquences de potentiels blocages. Au stade du **DOS**, l'IRSN constate que l'Andra prévoit, outre des dispositions de prévention (cf. *supra*), des dispositions de remise en état des équipements :

- en liaison surface-fond, l'Andra retient qu'en cas de panne du transfert incliné, des « *dispositions* », notamment pour parer la défaillance d'équipements et de l'alimentation électrique (elle précise que les batteries embarquées pourront être connectées aux prises électriques à l'aide de rallonges), permettront de terminer le cycle du transfert incliné.
- En surface, les opérations de maintenance corrective des ponts seront réalisées dans leurs positions de garage, avec accès direct des opérateurs aux locaux correspondants après un éventuel assainissement par des moyens téléopérés.
- Au sein de l'installation souterraine, l'Andra prévoit en cas de panne que l'équipement de manutention concerné, tel un chariot de transfert, soit dépose la hotte qu'il manutentionne, soit termine l'opération de manutention en cours « *en mode dégradé* ». L'évacuation de cet équipement est prévue à l'aide d'un

locotracteur⁶⁹ vers le local de maintenance de la ZSL et l'équipement est ensuite remplacé, notamment pour les chariots et les navettes de transfert sur rails de l'installation souterraine. L'Andra envisage en outre de le réparer sur place.

S'agissant en particulier du pont stockeur en alvéole MAVL, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction qu'en cas de blocage, le colis sera déposé par affalage des fourches puis le pont sera alors rapatrié par un « lièvre de dépannage » (treuil).

Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN. Le cas des alvéoles HA est traité au chapitre suivant.

7.2.4 RETRAIT DES COLIS ET OPERATIONS DE REOUVERTURE

L'ASN a demandé (2015 D10 [1]) qu'en « l'absence d'orientation précise sur les conditions de la réversibilité du stockage, l'Andra doit conserver une approche prudente visant à démontrer la possibilité du retrait de colis au cours de la phase d'exploitation de Cigéo, que les alvéoles soient scellées à la suite de leur remplissage ou ultérieurement. Les études menées devront en outre permettre d'apprécier les avantages et inconvénients de différentes options en terme de sûreté et de radioprotection, tant au cours de l'exploitation que sur le long terme ». L'ASN considère [7] que le principe de réversibilité se traduit notamment par « l'exigence de récupérabilité selon laquelle les déchets doivent pouvoir être retirés du stockage pendant une période encadrée par la loi ; dans des conditions de sûreté et de radioprotection maîtrisées, y compris en cas de dégradation des ouvrages et des colis de déchets ». Ce chapitre présente donc l'examen réalisé par l'IRSN concernant :

- les opérations relatives au retrait des colis, quelle que soit la cause de ce retrait (demande sociétale dans le cadre de la réversibilité, besoin de l'opérateur au cours de l'exploitation...) et avant ou après que des opérations de fermeture aient été réalisées, en situation normale comme dans des situations où les colis ou les ouvrages seraient dégradés ;
- les opérations de réouverture qui seraient nécessaires pour retirer des colis après fermeture d'alvéoles ou de galeries.

7.2.4.1 Retrait des colis avant ou après opérations de fermeture

L'Andra [42] définit la « récupérabilité » comme la « capacité à retirer des colis de déchets stockés en formation géologique profonde » et précise que « Cigéo est conçu pour permettre la récupération des colis de déchets qui y seront stockés pendant toute son exploitation, jusqu'à sa fermeture définitive, quel que soit le niveau de fermeture partielle de l'installation ». L'Andra [42] envisage la mise en œuvre de cette récupérabilité selon deux catégories de scénarios : (i) les « scénarios de retrait d'exploitation », qui « correspondent à des scénarios de retrait de certains colis juste stockés, ou en cours de mise en stockage. Ils sont utiles pour l'exploitation de Cigéo et font partie intégrante de cette exploitation », et (ii) les « scénarios hypothétiques de retrait », qui correspondent à « des scénarios qui seraient éventuellement mis en œuvre, dans le cadre de la réversibilité, suite à une mise en cause de la finalité du stockage comme mode de gestion de tout ou partie des déchets radioactifs stockés » ; ils sont étudiés pour évaluer leur compatibilité avec les options de conception de Cigéo et les conditions opérationnelles dans lesquelles ils pourraient être mis en œuvre mais l'Andra ne prévoit pas d'en demander

⁶⁹ Locotracteur : engin ferroviaire utilisé principalement pour la manœuvre des wagons et la formation des convois.

l'autorisation dans le cadre de la DAC et leur étude est donc moins détaillée. L'Andra a néanmoins précisé au cours de l'instruction qu'elle envisage de présenter, en tant que pièce complémentaire au dossier fourni en support de la DAC, un document décrivant l'« état des études de faisabilité » de ces opérations.

L'IRSN estime que la démarche retenue par l'Andra, qui consiste à regrouper les différents scénarios de retrait en différentes catégories et à adapter le niveau de la démonstration de sûreté à l'autorisation qui sera demandée pour la DAC, est pertinente dans son principe. Cependant, l'IRSN relève que l'Andra ne présente pas de scénarios de retrait en situation post-accidentelle et rappelle [21] qu'il considère que la récupérabilité des déchets doit rester un objectif de conception y compris après les situations accidentelles retenues dans les études de conception de ce projet. Ce point sera repris à la fin du présent chapitre. De plus, l'IRSN appelle l'attention sur la nécessité d'une véritable démonstration de faisabilité des opérations liées aux « scénarios hypothétiques de retrait » pour la DAC et pas seulement d'un « état des études de faisabilité ».

Scénarios de retrait d'exploitation

L'Andra [42] indique qu'environ un an après le chargement d'un alvéole MAVL ou d'un quartier HA, les équipements qui ne seront pas démontés pour être réutilisés dans d'autres alvéoles seront mis sous cocon (mise en position sûre, protection, vidange des fluides, mise hors tension...) afin de les préserver pour une éventuelle opération de retrait, l'ensemble des dispositifs de surveillance et/ou participant à la sûreté étant en revanche maintenus opérationnels en attente des opérations de fermeture. L'Andra [42] précise que la notion de colis « juste stockés ou en cours de mise en stockage » utilisée dans la définition des scénarios de retrait d'exploitation s'applique aux colis stockés dans des alvéoles dans lesquels l'ensemble des équipements de manutention sont encore en place et opérationnels, c'est-à-dire avant la mise sous cocon. Par ailleurs, l'Andra [42] indique que la mise en stockage des colis HA1/HA2 étant prévue vers 2075, elle n'a pas encore procédé à l'étude de scénarios de retrait de ce type de colis mais a toutefois précisé au cours de l'instruction qu'aucune spécificité notable n'ayant été identifiée (à part le nombre de colis et l'ampleur de l'opération à engager) entre un scénario de retrait de colis HA0 et un scénario de retrait de colis HA1/HA2, les scénarios HA0 donnent une bonne représentativité des scénarios HA1/HA2.

L'Andra retient ainsi deux « scénarios de retrait d'exploitation » pour chacune des familles de colis MAVL et HA0 : (i) le retrait d'un colis de stockage d'un alvéole et son retour en surface et (ii) le retrait d'un colis de stockage d'un alvéole et son transfert dans un autre alvéole, sous réserve de la disponibilité de ce dernier. **L'IRSN convient que l'élaboration des scénarios de retrait des colis HA1/HA2 sera plus pertinente après un premier retour d'expérience issu des colis HA0.** Cependant, l'IRSN observe que l'Andra envisage un mode d'exploitation où, pour des raisons d'optimisation, la mise sous cocon d'ouvrages de stockage fera partie du mode d'exploitation normal du stockage. L'IRSN estime que les opérations de remise en configuration d'exploitation d'un ouvrage mis sous cocon devraient aussi faire partie du périmètre de la DAC. Par conséquent,

L'IRSN estime que l'Andra devra présenter, dans le dossier de DAC, les opérations liées à la remise en exploitation d'un ouvrage de stockage mis sous cocon. Ce point fait l'objet de l'engagement E46-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

L'IRSN précise que ces opérations devront s'appuyer pour la DAC sur le retour d'expérience acquis soit par ailleurs en milieu industriel, soit spécifiquement en laboratoire de surface ou souterrain. Cependant, l'IRSN convient que la qualification complète de ces opérations paraît difficile à produire avant la phase pilote et que l'un des objectifs de

cette phase sera précisément de conforter la démonstration de sûreté, notamment des opérations d'exploitation, en conditions représentatives de celles d'un stockage.

Pour ce qui concerne la démonstration technique de la récupérabilité, l'Andra [42] indique que dans le cadre de « scénarios de retrait d'exploitation », les objectifs sont de pouvoir retirer les déchets des alvéoles et de les transférer vers les installations de surface ou vers un autre alvéole (i) de façon similaire à la mise en stockage (procédé inverse) et (ii) sur la base des mêmes objectifs et contraintes de sécurité et de sûreté. Néanmoins, s'agissant du retrait des colis HA et HAO, l'Andra retient le principe d'un « robot tracteur » (cf. Figure 42) au lieu du robot-pousseur utilisé pour la mise en place des colis. Par ailleurs, s'agissant du retrait des colis MAVL, l'Andra indique que les équipements ayant servi à leur mise en place seront complétés d'un système de contrôle de la contamination (par frottis réalisé à l'aide d'un bras télémanipulateur) ainsi que d'un système de fixation de l'éventuelle contamination labile (par projection de spray [39], cf. 6.1.7). Cependant, suite à la réunion préparatoire, l'Andra a précisé que ce contrôle de contamination n'était prévu qu'en « scénarios hypothétiques de retrait » et non pas en « scénarios de retrait d'exploitation ». **L'IRSN estime que ce type de contrôle devrait a priori avoir lieu avant tout déplacement de colis, y compris en « scénario de retrait d'exploitation », et que l'Andra devra justifier cette position.**

Quel que soit le type de colis, l'Andra [42] indique que les bases de sa démonstration reposent sur les principes suivants : robustesse et durabilité des composants et équipements intervenant dans la récupérabilité, surveillance des conditions de retrait, aptitude à la déconstruction des ouvrages de fermeture partielle, prise en compte de dispositions conservatoires dès la conception (par exemple, réserver de la place en cellule de manutention), réalisation d'opérations d'exploitation spécifiques (essais de mise en service, contrôles...) et réévaluation périodique des conditions de retrait. L'IRSN estime que cette approche est pertinente dans son principe.

Concernant la durabilité des composants et équipements nécessaires à la reprise de colis, l'Andra [42] indique que les éléments laissés en place dans les alvéoles doivent être suffisamment durables pour pouvoir être réutilisés ou pouvoir être remplacés. Par exemple, l'Andra a précisé lors de l'instruction que dans le cas des alvéoles MAVL, elle retenait à ce stade un système d'alimentation électrique du pont stockeur basé sur un « support fixe » (cf. Figure 74) - ou frotteurs - afin de limiter la charge calorifique dans la cellule de manutention et qu'un système de nettoyage des frotteurs (robot d'intervention-inspection) sera étudié ; l'Andra précise qu'une mesure conservatoire consisterait à préserver la place suffisante dans la cellule de manutention et à prévoir la connectique pour y installer éventuellement un système « fil-enrouleur » si les frotteurs étaient durablement défectueux. Au cours de l'instruction, l'Andra a également confirmé que ce pont stockeur disposerait aussi d'un « lièvre de rappel ». **L'IRSN estime que ces éléments sont satisfaisants à ce stade et qu'ils n'appellent pas de commentaire particulier de la part de l'IRSN autres que ceux, généraux, indiqués au chapitre 7.2.9.**

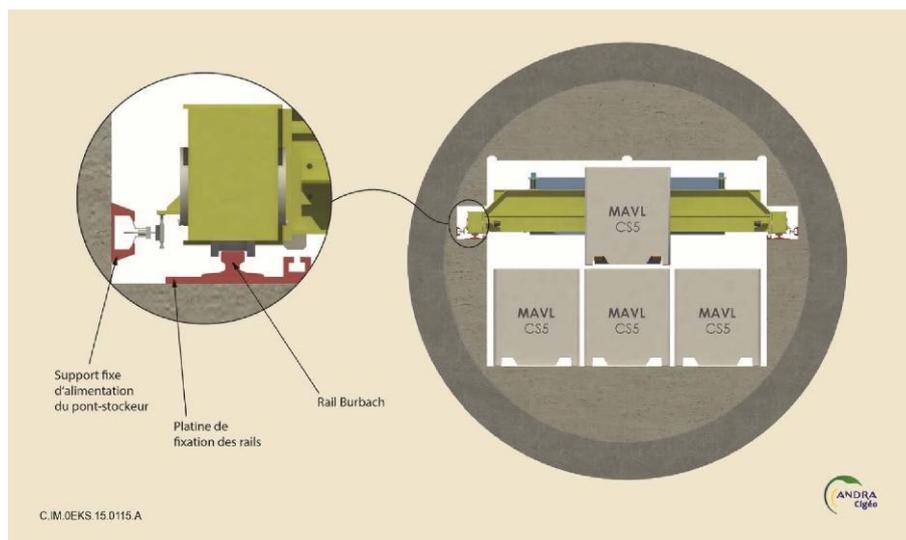


Figure 74 : Alimentation électrique du pont stockeur en alvéole MAVL [42]

Concernant la robustesse des dispositions prises en vue de la récupérabilité, l'Andra [42] présente des résultats d'essais de retrait de modèles de colis MAVL et HA réalisés en surface.

S'agissant des colis MAVL, ces essais ont porté sur un colis factice, déplacé de sa position nominale de plusieurs façons différentes : désaxage latéral, rotation autour de son axe vertical... La reprise de ce colis a été réalisée à l'aide d'un chariot à fourche, semblable ou adaptable aux systèmes de manutention retenus en alvéole MAVL (cf. Figure 40). L'Andra conclut de ces essais que le retrait d'un colis de stockage MAVL est faisable, dans des conditions « *couvrant les configurations géométriquement possibles* » du positionnement d'un colis en alvéole. L'IRSN estime que ces premiers éléments sont encourageants au niveau du DOS mais rappelle (recommandation 2011 R15 de l'ASN [1]) que l'Andra devra également présenter pour la DAC les dispositions permettant de remédier à la situation résultante de la chute d'un colis MAVL en alvéole.

S'agissant des colis HA, les essais de retrait ont porté sur des configurations visant à être représentatives de deux types de conditions dégradées : une déformation mécanique de l'alvéole HA et la présence de rouille à l'intérieur du chemisage ; expérimentalement, cette rouille a été obtenue par un brouillard salin complété d'un ruissellement d'eau à l'intérieur de l'alvéole générant ainsi une atmosphère saturée, ainsi que par le maintien d'une température de 90°C. L'Andra souligne que ces conditions physico-chimiques sont *a priori* plus sévères que celles qui seront rencontrées dans le stockage. S'agissant des essais réalisés dans un alvéole déformé, l'Andra précise qu'ils ont permis de vérifier la possibilité de retirer un colis alors que, d'une part, l'alvéole était non rectiligne, déformé par une sinusoïde majorante des défauts de rectitude attendus, et que d'autre part, deux tronçons de chemisage étaient décalés d'environ un centimètre l'un par rapport à l'autre. L'Andra conclut des essais réalisés dans l'alvéole corrodé que le retrait reste possible malgré l'accumulation de produits oxydés devant le colis de stockage jusqu'à la tête d'alvéole lors de sa traction par le robot. L'Andra signale toutefois un risque de blocage des dispositifs de fermeture de l'alvéole et de la hotte en cas d'accumulation trop importante de rouille et envisage l'utilisation d'un « *robot-brosseur* », dont la conception est en cours. L'IRSN estime que les essais présentés par l'Andra au stade du DOS mettent en jeu des conditions d'environnement en alvéole *a priori* plus défavorables que celles attendues au sein des alvéoles HA et de nature à être enveloppées de celles-ci, ce qui est satisfaisant. L'IRSN constate néanmoins que l'Andra ne développe pas dans ses essais de situations représentant l'enrouillement et la fragilisation de la gorge de préhension des colis. Or, ainsi qu'indiqué au chapitre 5.1.1, le point de contact du robot

tracteur sur les colis HA au niveau de la gorge de préhension en vue de les retirer (cf. Figure 17, à droite) est une singularité qui pourrait s'avérer être un point sensible au vieillissement et à la corrosion. A cet égard, l'Andra a précisé au cours de l'instruction que les produits de corrosion attendus dans la gorge de préhension du colis seraient écrasés par les doigts de préhension du robot tracteur lors de son arrimage au colis. L'IRSN estime que ceci concerne le maintien de la capacité d'arrimage du robot tracteur au colis en présence de rouille et qu'une réponse complète en termes de dimensionnement mécanique de la gorge de préhension nécessite de connaître les pertes de métal par corrosion dans cette zone singulière du colis (cf. chapitre 5.2 « Evolution des aciers » du présent rapport).

L'IRSN estime que les éléments ci-dessus sont satisfaisants et qu'ils constituent une première réponse à la demande 2011 R16 [1] de l'ASN, relative à l'efficacité des dispositions permettant de reprendre les colis de déchets pendant la période de réversibilité. Elle ne pourra toutefois être complétée qu'à la suite de la réalisation des démonstrateurs prévus par l'Andra (cf. *infra*).

Concernant les dispositions de surveillance de la récupérabilité, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction ne pas avoir encore défini les principes de surveillance (surveillance statistique, globale, périodique...) mais prévoir de présenter « *une première proposition* » de la surveillance des alvéoles MAVL et HA0/HA dans le dossier en support à la DAC. S'agissant de la démonstration de la récupérabilité des colis MAVL, elle précise [42] toutefois dans le présent dossier prévoir de surveiller certains paramètres en alvéole MAVL : la déformation de la voie de roulement du pont utilisé pour la mise en place des colis, les jeux entre les colis eux-mêmes et entre les parois de l'alvéole et enfin l'alignement des piles de colis de stockage. L'introduction de moyens spécifiques de surveillance de la partie utile de l'alvéole MAVL, équipés de systèmes d'imagerie ou de relevés dimensionnels, est à l'étude (éventuels robots ou dispositifs progressant sous les colis et/ou sur les rails). En outre, l'Andra considère que la surveillance sera menée de manière périodique dans tous les alvéoles MAVL en attente de fermeture et, pour les alvéoles MAVL fermés, seulement dans des alvéoles en inactif conçus pour être représentatifs. L'IRSN relève que la mise en œuvre de moyens de surveillance de jeux entre les colis sur toute la longueur des alvéoles MAVL, au sein desquels l'espace libre est rare, peut s'avérer complexe. Par ailleurs, l'Andra prévoit de surveiller les alvéoles HA0 et HA vis-à-vis de la récupérabilité et en particulier les paramètres relatifs aux jeux entre les conteneurs de stockage (ou les intercalaires) et le chemisage de l'alvéole ainsi qu'à la géométrie de la tête d'alvéole afin notamment de vérifier sa compatibilité avec l'accostage de la hotte. L'Andra envisage ainsi de surveiller périodiquement certains alvéoles HA actifs en attente de fermeture dits « alvéoles de surveillance spécifique » ou « témoins » et certains alvéoles inactifs conçus pour être représentatifs des alvéoles HA pour les alvéoles fermés. L'Andra a précisé au cours de l'instruction ne pas prévoir à ce stade d'introduire des moyens spécifiques dans les alvéoles mais envisager des mesures du comportement mécanique du chemisage sur les alvéoles témoin ainsi que l'implantation de dispositifs spécifiques à travers les brides de fermeture des alvéoles HA, en vue de surveiller certains paramètres d'ambiance. L'IRSN relève que l'accessibilité de l'atmosphère à l'intérieur des alvéoles HA est très réduite dans le concept actuel de l'Andra. En particulier, l'IRSN note que les conditions peuvent s'avérer très différentes en tête d'alvéole et au fond, aussi la surveillance au niveau de la bride pourrait s'avérer insuffisante. A ce stade, l'IRSN estime donc que la faisabilité de la surveillance envisagée par l'Andra dans les alvéoles HA/HA0 n'est pas acquise. Ainsi,

L'IRSN considère que l'Andra devra présenter, dans le dossier de DAC, la stratégie et les dispositions techniques de surveillance des alvéoles HA, notamment le maintien du jeu fonctionnel, en appui à la démonstration de la récupérabilité des colis. Ce point fait l'objet de l'engagement E47-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

Pour ce qui concerne les démonstrateurs à venir, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction qu'elle prévoyait de réaliser un programme spécifique d'essais de retrait de colis HA (factices) au Laboratoire souterrain, sur des ouvrages de taille réelle les plus proches possible de la conception finale, préalablement aux essais qui seront menés en phase industrielle pilote. Néanmoins, le calendrier et la nature exacte de ces essais seront précisés par le PDD actuellement en cours de mise à jour. **L'IRSN rappelle que de son point de vue (cf. chapitres 5.4.1, 7.2.2.3 et 7.2.4.2 du présent rapport), la réalisation de ce type d'essais de taille réelle sera nécessaire en vue du dépôt du dossier de DAC.** S'agissant des essais durant la phase pilote, l'Andra prévoit de réaliser des essais d'opérations unitaires, à la fois via des démonstrateurs et dans des alvéoles réels, mais pas d'essais de mise en œuvre générale de scénarios ; par exemple, l'essai d'un retrait complet des colis d'un alvéole entier n'est pas prévu. En outre, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction ne plus prévoir, comme initialement envisagé dans le PDD [35], de réaliser des alvéoles HA0 dont l'instrumentation serait incompatible avec les objectifs de sûreté à long terme mais dont les colis seraient *in fine* retirés et mis dans d'autres alvéoles, car « *la conception est orientée vers le développement de moyens de mesures pour la surveillance et l'observation entièrement compatibles avec les objectifs de sûreté à long terme* ». L'Andra n'a cependant pas apporté de précisions sur ces moyens de mesure (cf. *supra*, engagement E47-2017). **L'IRSN estime pertinente cette stratégie de démonstration progressive de la récupérabilité, en Laboratoire souterrain puis en phase pilote. L'objectif visé de se doter de moyens de surveillance n'impliquant pas, à terme, de retirer l'ensemble des colis d'alvéoles plus spécifiquement instrumentés, est en outre louable. Néanmoins, l'IRSN estime que, dans l'attente d'un retour d'expérience issu de la phase pilote, il ne peut être exclu de devoir retirer l'ensemble des colis d'un alvéole HA0 pour en établir le caractère réversible ou pour conforter la pertinence de la surveillance mise en place par une observation directe de l'état de l'alvéole.**

Scénarios hypothétiques de retrait

L'Andra retient les « scénarios hypothétiques de retrait » suivants : (i) le retrait d'un colis MAVL contaminé, (ii) la non-poursuite du stockage à l'issue de la phase pilote, (iii) le retrait complet de tous les colis d'un alvéole MAVL, (iv) le retrait complet de toutes les familles de colis HA0, (v) l'ouverture des galeries et des alvéoles scellés pour le retrait d'une famille de colis MAVL et enfin (vi) l'ouverture des galeries et des alvéoles scellés pour le retrait de toutes les familles de colis HA0. L'Andra décrit [42], de façon générale, les opérations et les délais nécessaires à de tels retraits (cf. Annexe T16). Par exemple, la durée nécessaire à la mise en œuvre du scénario relatif au retrait de tous les colis d'un alvéole MAVL serait de plus d'un an. Dans le cas où le quartier MAVL concerné aurait été fermé, cette durée s'ajoute à celle nécessaire à la réouverture du quartier et des alvéoles ainsi qu'à la remise en fonctionnement de la ventilation et des équipements de manutention, c'est-à-dire une durée estimée par l'Andra à quelques années. À cet égard, l'Andra a précisé lors de l'instruction que les efforts et les investissements significatifs que représentent les opérations de réouverture et de remise en fonctionnement de galeries et d'alvéoles fermés, pour certains de ces scénarios, constitueront des freins à la décision de reprise des colis (cf. chapitre 7.2.4.2). **L'IRSN en convient et rappelle qu'il concluait en 2014 sur la grande difficulté à assurer le retrait des colis stockés dans un alvéole fermé et/ou scellé.**

S'agissant de l'état des colis, l'IRSN note que l'Andra inclut dans ces « scénarios hypothétiques » la possibilité que les colis MAVL soient contaminés lors de leur retrait (cf. supra). En outre, elle indique que l'implantation de robots dédiés au traitement de la contamination « fait partie des possibilités offertes par la mesure conservatoire consistant à conserver les surfaces au sol correspondantes dans la cellule de manutention (et les systèmes d'ancrage et de passage de câbles) » et qu'elle sera étudiée en phase d'APD [39][42]. L'IRSN estime que le principe de conserver un espace dédié aux équipements en support aux éventuelles opérations de contrôle et de fixation de la contamination est satisfaisant au stade du DOS.

Enfin, s'agissant des capacités d'entreposage, l'Andra considère [42] que la réorientation des colis stockés dans Cigéo déclencherait un besoin de capacité d'entreposage et que la construction d'un entreposage tampon en surface destiné à faciliter la logistique associée à l'expédition des colis hors de Cigéo serait possible. L'IRSN adhère à cette conclusion pour ce qui concerne un scénario hypothétique impliquant le retrait d'un nombre important de colis mais estime que l'Andra devrait néanmoins identifier les capacités d'entreposages possibles pour gérer un éventuel accident qui impliquerait un retrait immédiat de quelques colis (cf. infra).

L'IRSN relève par ailleurs que l'Andra, considérant que le système de confinement assuré par les colis HA est suffisamment robuste (cf. chapitres 2.3.1, 7.1.2), ne retient pas à ce stade de cas de retrait de colis HA dont le confinement ne serait plus assuré ou pour lequel il existerait une suspicion de perte de confinement. Elle ne retient donc pas de dispositions pour la gestion de colis HA contaminés telles des opérations de contrôle et de fixation de la contamination. L'IRSN estime que le retrait d'un colis HA dont le confinement serait défaillant (ou simplement suspecté défaillant) doit rester possible, d'autant plus que le stockage des colis HA0 préfigure celui des colis HA1/HA2 dont le stockage interviendrait plusieurs décennies plus tard. L'IRSN rejoint sur ce point une observation faite par la revue du groupe d'experts réunis par l'AIEA réalisée à l'automne 2016 [8] suivant laquelle « en raison du grand nombre de conteneurs à stocker, il existe toujours une probabilité résiduelle de défauts de fabrication et de soudure (tout procédé industriel rencontre des déviations dans son procédé de production). Les défauts (avec et/ou sans pénétration) risquent de mener à une défaillance précoce des conteneurs ». De plus, il apparaît difficile de démontrer, selon les termes de la Loi de programme, que le stockage est réversible si le retrait de familles de colis n'est pas lui-même démontré. Ainsi,

l'IRSN considère que l'Andra devra présenter, dans le dossier de DAC, les dispositions qui pourraient être retenues en appui à un scénario hypothétique de retrait de colis HA postulés contaminés et dont la manutention reste possible. Ce point fait l'objet de l'engagement E48-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

L'IRSN estime que ces éléments vont dans le sens de la demande 2014 D19 de l'ASN [1], relative à la prise en compte des éléments pouvant conduire à une diminution de la capacité d'exercice de la réversibilité.

S'agissant enfin des scénarios de retrait de colis stockés qui nécessiteraient la réouverture de certaines parties scellées du stockage, l'IRSN convient des efforts considérables qui seraient à fournir pour réaliser ces opérations de réouverture, même si la faisabilité technique de ces opérations n'est pas *stricto sensu* hors d'atteinte (cf. chapitre 7.2.4.2). Ainsi, l'IRSN estime que la récupérabilité « aisée » des colis de déchets est intimement liée au degré de fermeture du stockage. L'IRSN estime que la stratégie retenue au stade du DOS par l'Andra de procéder aux opérations de scellement après la fin de l'exploitation de chaque quartier de stockage, examinée au chapitre 7.2.4.2, est favorable du point de vue de la récupérabilité.

Retrait des colis en situation post-accidentelle

L'Andra [39] considère que la priorité en cas de situations accidentelle ou incidentelle est d'assurer la « *mise en sécurité de l'installation* » et précise qu'à ce stade, aucune situation qui nécessiterait pour cette mise en sécurité le retrait immédiat de colis stockés n'a été identifiée. L'Andra envisage [42] ainsi le retrait de colis, dans le cadre d'une situation post-accidentelle, comme étant l'« *une des réponses possibles, sans pour autant devoir être envisagée systématiquement* ». En particulier, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction qu'après l'occurrence d'une situation accidentelle de dimensionnement, le retrait éventuel de colis pourrait faire l'objet de dispositions et d'équipements spécifiques « *ne pouvant être décrits de façon précise a priori* » et que les limites techniques de ces équipements seraient décrites en APD. L'IRSN note à cet égard que l'Andra retient l'exigence de disponibilité des outils de manutention des colis après la plupart des situations accidentelles retenues à ce stade. Par ailleurs, l'Andra a indiqué que suite à l'occurrence éventuelle d'une situation relevant du dimensionnement du PUI, le fonctionnement des équipements du procédé ne pouvait être garanti et que pour cette raison, la récupérabilité des colis ne pouvait être décrite. Elle précise toutefois que dans une telle situation, le déploiement d'un ensemble de moyens, spécifiques à la situation rencontrée, pourrait être nécessaire au retrait des colis. En tout état de cause, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que les critères qui seront analysés en support à un éventuel retrait de colis, dans le cas d'une situation post-accidentelle, seront fournis à la DAC et reposeront sur :

- la sûreté après-fermeture ;
- la pérennité des dispositions assurant la sûreté de l'exploitation ;
- les risques associés aux opérations de reprise des colis (notamment la radioprotection des travailleurs et du public) ;
- l'analyse des coûts et des bénéfices vis-à-vis du service industriel de l'installation.

L'IRSN constate que les exigences retenues par l'Andra pour concevoir Cigéo sont de nature à faciliter le retrait des colis après un accident mais que leur caractère suffisant n'est pas démontré. **L'IRSN estime ainsi que l'engagement de l'Andra 2014 E13 et la demande 2015 D11 de l'ASN [1], relatifs au rétablissement des diverses fonctions du stockage à la suite d'une situation accidentelle, ne peuvent à ce stade être considérés comme soldés.** L'IRSN convient que la décision de retirer des colis stockés devra être soumise à une évaluation particulière et qu'il est impossible de prévoir les conséquences de chaque situation accidentelle sur l'ensemble des équipements nécessaires au retrait. En revanche, la prise en compte des aspects liés à la récupérabilité dans l'étude des situations accidentelles retenues par l'Andra permettrait de définir des conséquences enveloppes pour les équipements nécessaires à ce retrait, et ainsi d'analyser d'éventuels besoins de dispositions spécifiques. **En tout état de cause, l'IRSN estime que la démonstration de la récupérabilité de colis stockés y compris après une situation accidentelle doit non seulement rester un objectif pour l'Andra mais doit constituer une exigence intégrée aux études de conception.** En effet, comme le soulignait l'IRSN à l'occasion de l'instruction du dossier « Maîtrise des risques en exploitation » de Cigéo, la récupérabilité des déchets dans toutes les situations, y compris les situations accidentelles, est une des conditions de maîtrise de la sûreté de l'installation [21]. Ainsi,

l'IRSN considère que l'Andra devra associer, à l'examen de la mise en exploitation de Cigéo, dans le dossier de DAC, l'analyse de la possibilité de retrait de colis susceptibles d'être impactés lors d'accidents de dimensionnement de l'installation ou du PUI et l'identification, le cas échéant, de dispositions complémentaires. Ce point fait l'objet de l'engagement E49-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

7.2.4.2 Opérations liées à la réouverture et stratégie de fermeture

L'Andra rappelle [42] que le retrait des colis doit rester possible jusqu'à la fermeture définitive de Cigéo, prévue à ce stade à l'horizon 2150. Par ailleurs, le PDE [41][41] de Cigéo prévoit à ce stade les premières opérations de fermeture d'alvéoles et de galeries vers 2070 dans le quartier HAO et 2100 dans le quartier MAVL. Le retrait de colis qui seraient stockés dans un alvéole fermé conduirait donc à la déconstruction des premiers ouvrages de fermeture. L'Andra considère que la mise en œuvre de ces opérations de déconstruction, qui ne sont pas programmées à ce stade, nécessitera une autorisation spécifique et que c'est à cette échéance que l'évaluation de sûreté associée devra être complète. L'Andra présente donc, au stade du DOS, les études préliminaires de faisabilité de la déconstruction des premiers ouvrages de fermeture ; ces études seront approfondies d'ici la DAC et au-delà, et le programme d'essais associé sera décrit plus précisément dans le cadre de la DAC. L'IRSN convient qu'au stade du DOS, les études de faisabilité de la déconstruction des ouvrages de fermeture dont la construction est envisagée avant la fermeture définitive de Cigéo, sont suffisantes. A ce titre, la demande 2014 D4 peut être considérée comme soldée. Néanmoins, l'IRSN considère que la récupérabilité imposant aux ouvrages de fermeture dont la construction est envisagée avant la fermeture définitive de Cigéo d'être déconstructibles, la faisabilité technique de cette déconstructibilité ainsi que l'évaluation de sûreté associée à de telles opérations font partie de la DAC de Cigéo. L'IRSN estime par conséquent que des éléments tangibles relatifs aux points techniquement sensibles de cette démonstration devront être présentés dans la DAC. Ces points, développés dans la suite de ce chapitre, concernent notamment l'inertage d'un alvéole HA et la possibilité de forer/découper en atmosphère potentiellement explosive (risque ATEX).

Concernant la fermeture des alvéoles et des galeries HA1/HA2, l'Andra indique [42] que cette opération étant prévue à l'horizon 2145, il est difficilement envisageable qu'elle soit entreprise après une centaine d'années de retour d'expérience dans Cigéo pour être déconstruite seulement quelques années plus tard, juste avant la fermeture définitive de Cigéo prévue en 2150. L'IRSN estime que les causes d'une telle décision étant par nature difficilement prévisibles, ce scénario ne peut pas être totalement exclu. En outre, l'Andra retenant dans sa stratégie de fermeture une certaine flexibilité sur les échéances de mise en œuvre des opérations de fermeture partielle (voir à la fin du présent chapitre), il ne peut pas non plus être exclu que la fermeture de certains quartiers HA1/HA2 intervienne finalement plus tôt que prévu. L'Andra ajoute que mis à part certains aspects thermiques, les opérations à mener pour rouvrir des quartiers HA1/HA2 ne seraient *a priori* pas très différentes de celles relatives au quartier HAO. L'IRSN en convient pour ce qui concerne la démonstration de faisabilité visée au stade de la DAC.

L'IRSN observe donc que ces opérations de réouverture concernent d'éventuelles opérations de déconstruction de remblais, de scellements de galeries et d'ouvrages de fermeture d'alvéoles HAO et MAVL mis en place de 50 à 80 ans plus tôt. L'Andra n'identifie pas de difficulté particulière pour la réouverture des galeries : elle prévoit un déblayage par pelle mécanique dirigé vers une bande transporteuse et une déconstruction des massifs d'appui en béton des ouvrages de scellement par sciage. L'Andra précise à cet égard qu'elle bénéficie déjà du retour d'expérience acquis lors du démontage de l'essai FSS (Full Scale Seal experiment). Elle mentionne également, bien que ce ne soit pas l'option retenue par le DOREC, la possibilité de creuser des galeries contournant les scellements. L'IRSN estime que les opérations de déblayage et de déconstructions étant à ce stade envisagées au moyen d'engins thermiques, le risque d'incendie doit être évalué. L'Andra devrait également définir les règles de gestion des risques liés à la coactivité. L'IRSN rappelle en outre que les alvéoles fermés produisent des gaz de radiolyse et/ou de corrosion, notamment de l'hydrogène, et constate que l'Andra n'évalue pas la possibilité pour ces gaz d'atteindre

les galeries et de conduire à un risque d'atmosphère explosive (ATEX). L'IRSN estime que pour la DAC, l'Andra devra avoir quantifié le risque ATEX et selon les cas, soit avoir montré qu'il est gérable par des dispositions habituelles de chantier, soit avoir réuni des éléments probants (*i.e.* bénéficiant de suffisamment de retour d'expérience par ailleurs ou ayant fait l'objet de premiers essais) montrant que ce point sensible de la démonstration de faisabilité n'est pas bloquant. L'IRSN note à cet égard que l'Andra [39] a mis en place un programme de travail relatif aux risques ATEX (identification des situations, évaluation des dispositifs de prévention, détermination des conséquences, dispositions compensatoires...) susceptible d'apporter des éléments de réponse à la demande de quantification du risque ATEX.

À l'approche de la partie utile des alvéoles dans le cadre d'opérations liées à la réouverture, l'Andra prévoit des dispositions particulières. Concernant les alvéoles MAVL, pour faire face à une éventuelle contamination à l'intérieur de l'alvéole, l'Andra envisage la mise en place d'une ventilation provisoire de type « chantier de démantèlement » entre la cellule de manutention et la galerie avant d'entreprendre la déconstruction du mur d'obturation en béton qui sépare la cellule de manutention de la partie utile de l'alvéole. Pour se prémunir de tout risque d'explosion lors de la déconstruction de ce mur, l'Andra envisage que ceux des alvéoles concernés par ce risque soient équipés de dispositifs fixes laissés en attente d'une éventuelle réouverture pour faciliter la mesure et l'évacuation de ces gaz. Ce dispositif serait un conduit métallique traversant le mur d'obturation, fermé côté cellule par une vanne étanche et protégé du remblayage par une cloche métallique. Plusieurs dispositifs pourraient être intégrés dans le mur d'obturation (e.g. en position haute et basse). Pour plus de robustesse, ces dispositifs pourraient être doublés d'un conduit fermé (e.g. une tige) destiné à être percé en cas de dysfonctionnement du raccord étanche. Aucune disposition particulière n'étant à prendre pour réutiliser l'alvéole ultérieurement, le percement du mur d'obturation côté galerie de ventilation est envisagé par forage réalisé depuis la galerie de retour d'air suivant une méthode douce et en présence d'une ventilation secondaire de type « travaux ». Un balayage serait ensuite mis en place pour chasser les gaz présents dans l'alvéole. Une fois les risques liés aux gaz maîtrisés, la déconstruction du mur serait finalisée par une méthode douce (e.g. carottage et sciage sous boue pour éviter la formation de point chaud et d'étincelles) et une ventilation « procédé » de l'alvéole serait remise en service. L'IRSN estime que l'Andra a bien identifié les risques liés à la réouverture d'un alvéole MAVL et propose des solutions techniques *a priori* pertinentes. Il conviendra néanmoins que pour la DAC, l'Andra ait quantifié le risque ATEX et montré que les solutions techniques envisagées (ventilation provisoire, carottage, sciage sous boue...) sont efficaces dans ces conditions. De la même manière, l'Andra devra vérifier que la prise en compte de dispositions de radioprotection des travailleurs n'est pas bloquante vis-à-vis de ces opérations de réouverture.

Concernant les opérations de réouverture d'un alvéole HAO, l'Andra indique [42] que celles-ci comprennent le retrait par forage du matériau d'obturation en tête d'alvéole, le drainage de l'eau éventuellement présente dans l'alvéole vers des cuves, le retrait du bouchon de radioprotection de fermeture et son remplacement par un bouchon de radioprotection d'exploitation. En préalable à ces opérations, l'Andra prévoit une analyse et une évacuation des gaz accumulés dans l'alvéole, ainsi qu'un éventuel inertage de celui-ci, qui seraient réalisés au travers de la bride de fermeture présente à l'interface entre la galerie et la tête d'alvéole (cf. chapitre 2.2.3.2). L'IRSN observe que l'Andra ne prend pas en compte la possibilité d'une présence de contamination à l'intérieur de l'alvéole au moment de sa réouverture ce qui est cohérent avec le fait qu'elle exclut la possibilité d'une défaillance de surconteneur pendant la période d'exploitation. L'IRSN rappelle (cf. chapitre 7.1.2) qu'il considère, au contraire, que cette possibilité doit être envisagée. Par ailleurs, l'IRSN constate que l'Andra ne précise pas comment seraient menées, à travers la bride, les opérations préalables d'analyse et d'évacuation des gaz (voire d'inertage) de

l'alvéole. L'IRSN relève que ces opérations devront être réalisées en présence d'un matériau de fermeture dont la nature exacte n'est pas définie à ce stade (béton, argile en cours de saturation...) et face à un alvéole borgne, *i.e.* ne permettant pas d'accéder facilement à l'arrière de l'alvéole pour mettre en place un balayage efficace des gaz sur la longueur de l'alvéole. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que « *ces opérations ne sont pas définies techniquement à ce stade* », la bride pouvant être « *conçue avec deux orifices dédiés* », l'un « *permettant d'extraire les gaz de l'alvéole par pompage* » et l'autre servant « *d'évent permettant d'injecter un gaz inerte si besoin* », ces opérations pouvant « *être relativement longues* » et « *utiliser plusieurs types de gaz inertes plus ou moins lourds en vue de gagner en efficacité (les alvéoles sont montants)* ».

L'IRSN estime que le degré de maturité des solutions techniques présentées par l'Andra est encore insuffisant et que la possibilité de rouvrir un alvéole HA après mise en place de son ouvrage de fermeture n'est pas acquise. L'acquisition des éléments clés de cette démonstration de faisabilité technique ne nécessite pas la mise à disposition des premiers ouvrages de Cigéo. Aussi, l'IRSN considère que ces éléments devront être apportés pour la DAC.

Stratégie de fermeture

L'Andra a précisé au cours de l'instruction que la démarche appliquée pour définir les grandes étapes de fermeture de Cigéo a consisté en l'étude de différents scénarios de fermeture des zones de stockage HA0, MAVL et HA1/HA2 en considérant pour chaque scénario trois types d'échéances de fermeture : « au fil de l'eau », en fin de remplissage du quartier et en fin d'exploitation de Cigéo. Pour chaque scénario, l'Andra a identifié des avantages et inconvénients selon les critères suivants :

- Sûreté en exploitation : risques de coactivité entre les opérations de mise en stockage et de fermeture, risques liés à la présence d'hydrogène et possibilités d'inertage, risques de diminution des possibilités de surveillance, possibilités de contrôler la partie utile des alvéoles ;
- Surveillance et acquisition de connaissances : possibilités d'auscultation des alvéoles, réalisation des opérations de fermeture dans un ordre de complexité croissante afin d'optimiser le retour d'expérience acquis, délais nécessaires à l'acquisition du retour d'expérience des démonstrateurs de la phase pilote ;
- Service industriel : impact sur la réception des colis (respect du PIGD) ; les scénarios qui privilégient la fermeture au plus tôt des alvéoles consomment la quasi-totalité de la flexibilité d'exploitation ;
- Récupérabilité : les opérations de réouverture puis de remise en fonctionnement de galeries et d'alvéoles fermés nécessiteraient des efforts et des investissements significatifs qui constitueront des freins à la prise de décision ;
- Optimisation technico-économique : le fait de mener un seul chantier de fermeture pour les alvéoles et les galeries d'un quartier permet d'optimiser sa réalisation par rapport à son fractionnement en plusieurs étapes (6 chantiers distincts sur la zone MAVL dans le scénario de fermeture des alvéoles au plus tôt).

De cette analyse multicritères découle la stratégie de fermeture progressive en trois grandes étapes présentée dans le PDE [41] : fermeture des alvéoles HA0 vers 2070, fermeture du quartier MAVL vers 2100 et fermeture des quartiers HA1/HA2 vers 2145 pour une fermeture définitive de Cigéo vers 2150 (cf. chapitre 2.4). L'Andra précise

que des scénarios de fermeture différents pourront être menés si des éléments nouveaux sont identifiés, en particulier lors des études d'APD, pendant les essais, puis pendant toute la durée de vie de l'installation.

L'IRSN constate que l'Andra a réalisé une analyse permettant d'apprécier les avantages et inconvénients de différentes options de fermeture telle que demandée par l'ASN (2015 D10) mais que cette analyse n'a été jointe au DOS que sous forme synthétique lors de l'instruction. Par conséquent, la réponse de l'Andra à la demande de l'ASN devra être jointe à la DAC.

L'IRSN estime que les critères retenus par l'Andra pour apprécier les différentes possibilités en matière de stratégie de fermeture du stockage sont pertinents ; néanmoins, cette analyse n'ayant pas été communiquée pendant l'instruction, l'IRSN ne peut se prononcer sur le poids attribué par l'Andra à ces différents critères. Des éléments communiqués par l'Andra pendant l'instruction, l'IRSN relève en particulier que l'échéance visée pour la première étape de fermeture (2070 : quartier HA0) devrait permettre à l'Andra de bénéficier d'un premier retour d'expérience des démonstrateurs mis en place pendant la phase pilote (alvéole HA inactif fermé, coupure hydraulique d'une galerie, scellements de galerie et de descenderie) et dont la lente évolution nécessite plusieurs dizaines d'années de suivi ; l'étape suivante (2100 : quartier MAVL) laisse encore quelques décennies pour tirer profit du retour d'expérience issu de la fermeture du quartier HA0 et de son suivi post-fermeture. L'IRSN note à cet égard que la fermeture du quartier MAVL en un seul chantier devrait permettre de limiter les risques liés à la possible présence d'hydrogène après l'arrêt de la ventilation. Enfin, la fermeture des quartiers HA1/HA2, envisagée à ce stade comme la dernière étape avant la fermeture définitive de Cigéo, devrait permettre à l'Andra de bénéficier du retour d'expérience issu des opérations de fermeture précédemment réalisées et d'autre part, de maintenir le plus longtemps possible ces colis à un niveau de récupérabilité élevé.

En conclusion, l'IRSN estime que la stratégie de fermeture progressive privilégiée par l'Andra apparaît comme un compromis acceptable à ce stade entre les différents critères qu'elle a identifiés. Cependant, à la différence de ce qui est prévu pour le quartier HA0, l'IRSN observe que le PDE [41] ne prévoit pas à ce stade de démonstrateur d'alvéole MAVL inactif fermé qui permettrait d'acquérir un retour d'expérience préalable sur le comportement post-fermeture de ces ouvrages. Aussi, l'Andra devra préciser à l'échéance de la DAC de quelle manière elle se dotera, préalablement à la fermeture du quartier MAVL, des connaissances nécessaires relatives au comportement post-fermeture de ces ouvrages.

7.2.5 INONDATION D'ORIGINE INTERNE

Au stade du DOS, l'Andra présente la liste des différents réseaux d'alimentation en eau ou de collecte des effluents liquides, sources potentielles d'inondation. L'Andra présente également les principes retenus en termes de dispositions de surveillance (détecteurs de pression ou débit, des sondes et des rondes de surveillance) et de limitation des conséquences (vannes de sectionnement sur détection de variations brutales de débits, dimensionnement des cuves de rétention et des caniveaux de récupération). L'IRSN n'a pas de commentaire sur ces principes.

A ce stade du projet, l'Andra ne présente cependant aucun élément quantitatif permettant de répondre à l'engagement 2010 E10 d'évaluer les quantités d'eau attendues dans le stockage pendant sa période d'exploitation. Aussi, l'IRSN estime que l'Andra devra, en appui du dossier de DAC, à l'image de la démarche du guide ASN n°13 [185] applicable aux installations de surface, recenser par sources d'eau les situations à risque

d'inondation d'origine interne pour l'ensemble des installations de **Cigéo**, indiquer les volumes mobilisables et le mode de gestion prévu.

7.2.6 ACTIVITES HUMAINES

En réponse à la demande 2014 D17 de l'ASN [1] de joindre au **DOS** une esquisse de la notice prévue au II. de l'article 8 du décret du 2 novembre 2007 présentant les capacités techniques de l'Andra en vue de la construction et de l'exploitation de cette installation, l'Andra a transmis ladite notice [44], présentant les principes qu'elle retient pour concevoir et préparer la mise en place de l'organisation nécessaire à l'exploitation de cette installation, incluant les interfaces avec d'éventuels sous-traitants.

La démarche « Facteurs Organisationnels et Humains »⁷⁰ (**FOH**) vise à favoriser la conception d'un système exploitable de façon efficace et sûre. Pour ce faire, au fur et à mesure que des options techniques ou organisationnelles se précisent, il s'agit d'anticiper le travail humain futur, d'identifier des difficultés probables et les risques associés afin d'ajuster à temps les décisions de conception.

En conséquence, l'IRSN a examiné :

- la démarche mise en place par l'Andra pour identifier des situations d'exploitation (normales et dégradées) que les opérateurs pourront avoir à gérer dans le futur et les tâches critiques vis-à-vis de la sûreté, en y intégrant la question de la sous-traitance de certaines activités ;
- l'organisation générale du projet pour mener cette démarche et intégrer ses résultats dans les choix de conception du projet.

A cette fin, outre l'examen de documents transmis par l'Andra, l'IRSN a réalisé au cours de l'instruction des entretiens avec des membres de la maîtrise d'ouvrage (**MOA**) et de la maîtrise d'œuvre (**MOE**), pour ce qui concerne les aspects relatifs aux **FOH**.

En premier lieu, le pilotage du projet **Cigéo** [44] est organisé autour d'une direction unique, la Direction du Projet **Cigéo** (DPC), dont les missions consistent à définir les exigences auxquelles **Cigéo** doit répondre, les traduire en spécifications de besoins à destination de la **MOE** système Gaiya, veiller à leur prise en compte dans les solutions techniques proposées par Gaiya et assurer les arbitrages nécessaires entre les besoins exprimés et leur faisabilité. Pour ce faire, la DPC s'appuie sur l'ensemble des directions parties prenantes de la conception de **Cigéo** : la Direction de l'ingénierie (DDI), la Direction « Sûreté, Environnement et Stratégies Filières » (DISEF), la Direction du développement, de l'innovation et de l'international (D2I) et la Direction de la recherche et du développement. Le directeur du projet **Cigéo** a sous son autorité directe l'ensemble des acteurs décisionnels de ces différentes directions qui lui sont rattachés fonctionnellement.

Dans ce contexte (cf. Figure 75), la prise en compte des **FOH** dans la conception du projet **Cigéo** mobilise plusieurs acteurs : une cellule d'exploitation représentant le futur exploitant au sein de la maîtrise d'ouvrage, un représentant des **FOH** et des spécialistes **FOH** au sein des maîtrises d'œuvre système et sous-systèmes.

⁷⁰ Ou Facteurs Socio-Organisationnels et Humains (FSOH)

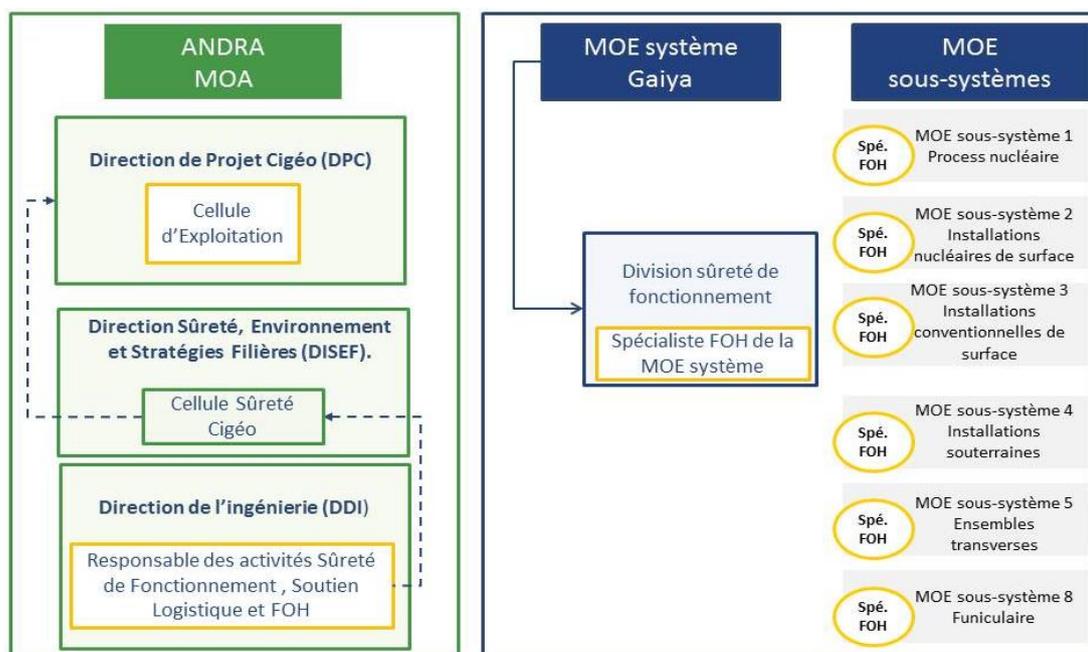


Figure 75 : Positionnement des « acteurs FOH » dans l'organisation du projet Cigéo [44]

Au sein de la DPC, la cellule d'exploitation est composée de trois personnes qui toutes ont un parcours d'ancien exploitant. A cet égard, l'IRSN estime que cette expérience leur permet d'intervenir de façon significative dans les choix structurants du projet. A titre d'exemple, les choix de conception s'orientaient initialement sur des activités humaines réalisées au plus près des colis dans les installations souterraines. C'est en mobilisant leur expérience d'exploitants que les membres de la cellule d'exploitation ont réussi à convaincre les acteurs du projet d'automatiser autant que possible le procédé.

L'Andra a également précisé que la Cellule d'Exploitation participe aux réunions techniques organisées par la DDI avec les maîtrises d'œuvre sous-systèmes pour suivre l'évolution de la conception du procédé, donner sa vision d'exploitant et demander des études complémentaires lorsque nécessaire. A titre d'exemple, comme sept types de colis de stockage différents sont retenus au stade du DOS, certains outils de manutention doivent pouvoir adopter sept configurations différentes. Or, un changement de configuration de ces outils induit de nombreuses opérations manuelles, susceptibles de comporter des risques d'erreurs si les différentes configurations ne sont pas bien identifiées, notamment à l'aide d'un système de détrompage. Pour la cellule d'exploitation, ces éléments en lien avec la pénibilité du travail et les risques d'erreurs doivent être rapprochés d'éléments relatifs aux flux de colis afin de mieux orienter les choix de conception. C'est pourquoi la Cellule d'Exploitation a demandé des études complémentaires à Gaiya concernant la fréquence des changements de configuration.

Enfin, à ce stade d'avancement du projet, la cellule exploitation a élaboré un document [230] qui présente les principes préliminaires d'exploitation de Cigéo. Lors de l'instruction, l'Andra a précisé que ce document constituait le cahier des charges « Exploitation » à destination de la MOE système pour la phase d'APD. Il a été décliné en termes de « Doctrine d'exploitation » [231] par la MOE FOH Système à l'intention des MOE FOH des sous-systèmes.

Au regard de ces différents éléments, l'IRSN considère que la cellule d'exploitation dispose d'une réelle capacité d'influencer les choix de conception pour tendre vers une exploitation efficace et sûre de Cigéo, capacité renforcée par l'expérience de ses membres en matière de sûreté d'exploitation, par ses missions et son rattachement à la direction du projet.

En deuxième lieu, l'Andra a défini ses objectifs en matière de prise en compte des FOH, dont elle a confié la mise en œuvre à la maîtrise d'œuvre système Gaiya [228]. Ainsi, dès la phase d'esquisse du projet [229], l'Andra a confié à la maîtrise d'œuvre système Gaiya, la responsabilité :

- « de mettre en place une organisation qui permette de clarifier les concepts FOH pris en considération, d'identifier les opérations sensibles pour la sûreté de la future installation et déterminer les exigences d'ordre FOH associées à ces activités ;
- d'établir un plan FOH décrivant l'organisation, les activités, le suivi d'activités, le planning et les fournitures pour atteindre les objectifs attendus dans le domaine des FOH ».

En outre, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction qu'au sein de la maîtrise d'œuvre système, un expert « senior » en FOH est responsable de toutes les activités FOH des maîtrises d'œuvre système et sous-systèmes. L'Andra précise également que chacune des maîtrises d'œuvre sous-systèmes bénéficie de l'appui de spécialistes FOH.

Comme en témoignent les objectifs FOH intégrés dans le cahier de charges de la maîtrise d'œuvre système et les missions assignées à la cellule d'exploitation, l'IRSN relève que les questions relatives au travail d'exploitation futur probable de Cigéo ont été intégrées dès le début du projet par l'Andra au même titre que d'autres facteurs (techniques, financiers, réglementaires...), susceptibles d'orienter les choix de conception.

L'IRSN considère que l'intégration des aspects FOH dans les phases amont du projet Cigéo est satisfaisante, dans la mesure où elle offre à l'Andra la possibilité de reconsidérer, pendant la conception, des options techniques susceptibles d'occasionner des difficultés d'exploitation vis-à-vis de la sûreté ou de la radioprotection des travailleurs. L'IRSN estime que la demande de l'ASN 2014 D21 relative à la prise en compte des besoins des futurs intervenants et de la future organisation dans les choix de conception peut être considérée comme soldée.

En pratique, l'IRSN relève que d'après les éléments transmis au cours de l'instruction, le travail des spécialistes FOH des MOE a produit un ensemble de 250 exigences FOH structurées sur la base de principes généraux tels que « développer une culture d'entreprise commune », « faire de la sécurité une priorité » ou encore « fournir un travail qui fasse sens ». Ces exigences sont formulées selon différentes thématiques (conditions de vie au travail, ambiances de travail, charge de travail...) ou activités (décontamination, surveillance de la ventilation, surveillance de la radioprotection...). Ces exigences doivent être prises en compte par les MOE sous-systèmes pour la conception des différents sujets techniques : du fait qu'elles ne s'appliquent pas de la même façon à tous les systèmes et sous-systèmes, elles sont classées en trois niveaux d'atteinte à respecter (non négociable, négociable, sans objet). L'Andra a indiqué que ces exigences FOH ont été validées par la représentante de la sûreté au sein de Cigéo. Elles doivent permettre au représentant FOH de la MOA de contrôler leur prise en compte effective dans la conception de Cigéo. L'IRSN estime que la formalisation et le suivi d'exigences hiérarchisées sont pertinents sur le plan des principes, en particulier à l'égard de la prise en compte d'une durée importante du projet Cigéo avant la construction de l'installation.

En troisième lieu, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que de nombreux échanges se sont tenus entre la sûreté et la cellule d'exploitation. Ceux-ci ont permis de questionner l'organisation retenue par Gaiya et d'influer sur le périmètre fonctionnel des équipes, afin de minimiser les nuisances induites par des tâches différentes au sein d'un même périmètre. En outre, l'Andra a indiqué que l'avancement et la cohérence des activités FOH sont assurés par le biais de réunions auxquelles participent des acteurs de la maîtrise d'ouvrage et des maîtrises d'œuvre

système et sous-système de Gaiya. L'IRSN observe que les réunions d'échanges entre la cellule d'exploitation et les spécialistes FOH des MOE systèmes et sous-systèmes ont permis d'aboutir à une représentation partagée de principes directeurs structurants pour la conception de l'installation. Ainsi, les échanges entre la Cellule d'Exploitation et les spécialistes FOH des MOE ont conduit à une décision partagée de centralisation du pilotage de la future installation à partir d'une salle de conduite unique et centralisée au lieu d'une conception basée sur plusieurs salles de conduites locales et spécialisées, ce qui aurait compliqué significativement la surveillance et le pilotage de l'installation ainsi que la coordination des actions de gestion de crise en situation dégradée. Aussi, l'IRSN estime que les modalités de coordination et d'échanges mises en place au cours de la phase d'APS ont permis de confronter une variété de points de vue qui concourent à la maîtrise des risques et d'orienter les choix techniques et organisationnels au profit d'une exploitation plus sûre.

Ces trois points forts de l'organisation de Cigéo sont toutefois à mettre en regard, selon l'IRSN, d'une insuffisance de l'intégration des démarches précitées. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé en effet qu'entre 2013 et 2014, ces réunions « FOH » se sont déroulées mensuellement mais qu'elles s'étaient interrompues depuis. Cette absence prolongée d'échanges entre la cellule d'exploitation et les représentants FOH de la MOA et de la MOE a conduit à un manque de cohérence entre les différents documents respectivement produits par ces acteurs, à savoir les « Principes préliminaires et modalités d'exploitation de Cigéo - Vision exploitation » [230], produits par la cellule exploitation, sa déclinaison en termes de « Doctrine d'exploitation » [231] élaborée par la MOE FOH système à destination des MOE FOH sous-système et le bloc d'exigences FOH défini par la MOE FOH système, transmis au cours de l'instruction. A titre d'exemple, la cellule d'exploitation retient en salle de conduite quatre postes de travail spécialisés selon les ensembles fonctionnels du process : déchargement CP - Contrôle CP et transferts en CS - Transfert en alvéoles - Elaboration et contrôle colis de stockage. *A contrario*, la MOE FOH système annonce que « la structuration des postes n'est pas nécessairement le reflet de la structure du process découpé en ensembles fonctionnels ». A cet égard, l'IRSN estime, comme la MOE FOH système, que la spécialisation des postes de travail en salle de commande ne saurait être figée trop tôt, en l'absence d'une connaissance plus fine des situations de travail auxquelles seront confrontés les opérateurs et qui peuvent varier en fonction d'éléments tels que le nombre de colis entrant à gérer simultanément, les opérations à suivre en parallèle, ou bien la gestion d'une situation dégradée ou incidentelle. Une spécialisation prématurée des postes de travail pourrait ainsi aboutir à une structuration des informations peu adaptée aux opérations confiées *in fine* aux opérateurs en salle de commande. D'autres exemples d'incohérences, notamment entre les principes préliminaires de l'Andra et les exigences FOH, sont également à dénombrer.

Par ailleurs, l'Andra annonce pour la phase d'APD un mode de coordination à travers la tenue de revues. Ainsi, à l'issue de la conception d'un ensemble technique cohérent au sein d'un sous-système, la MOE sous-système, la MOE système et la MOA organisent une revue. Au regard des éléments présentés ci-dessus, l'IRSN estime que ces revues sont nécessaires mais pourraient ne pas être suffisantes. En effet, l'IRSN considère qu'en phase d'APD, la coordination du projet est essentielle afin de s'assurer de la cohérence entre les différents composants du système. Sur la base du retour d'expérience de projets de grande envergure, l'IRSN relève que l'ensemble du système à concevoir ne peut être défini initialement et que les solutions se construisent de façon progressive, nécessitant des allers et retours permanents entre MOA et MOE, avec l'implication des spécialistes concernés des points à clarifier. Cette construction progressive ne peut se faire qu'à travers la tenue de points de rendez-vous permettant aux différents acteurs concernés d'échanger, de se comprendre et d'arbitrer lorsque nécessaire. Par conséquent, l'IRSN estime que le bien fondé du mode de fonctionnement mis en place par l'Andra pour l'intégration des FOH dans le

projet Cigéo repose sur une coordination étroite entre la Cellule d'Exploitation, les spécialistes FOH de la MOA et des MOE et les responsables techniques des sous-systèmes, pour d'une part échanger et arbitrer en ce qui concerne la conception de chaque composant, et d'autre part, dans une perspective transverse, assurer une conception cohérente de l'ensemble des systèmes.

Aussi, l'IRSN estime que l'Andra devra décrire, dès que possible, dans son plan de management de projet de Cigéo une organisation qui permette à l'ensemble des parties prenantes de la MOA et de la MOE de construire une vision partagée des principes d'exploitation de Cigéo dans l'objectif d'assurer, en fin d'APD, la complétude et la cohérence d'ensemble des spécifications détaillées pour une exploitation fiable. En particulier, cette organisation visera à favoriser une interaction tout au long du projet entre la cellule d'exploitation, le représentant FOH de la MOA, les spécialistes FOH de la MOE, les spécialistes sûreté de la MOA et les responsables techniques des sous-systèmes. Ce point fait l'objet de l'engagement E50-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

S'agissant des compétences spécifiques mobilisées pour les acteurs clés de cette organisation, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction avoir nommé un représentant FOH (cf. Figure 75 ci-dessus) pour assurer le pilotage et le suivi des études menées par les spécialités FOH des maîtrises d'œuvre système et sous-systèmes. A cet égard, l'IRSN estime que les conditions du succès d'une intégration efficace des FOH dans un projet de conception s'appuient, entre autres, sur la présence au sein de la MOA d'un référent FOH dont les compétences et le positionnement doivent lui permettre de :

- contribuer à l'expression des besoins de la MOA en matière d'exploitation future ;
- traduire ces besoins en exigences FOH et s'assurer de leur prise en compte par la MOE ;
- participer aux arbitrages entre les besoins exprimés par la MOA et les solutions de conception proposées par la MOE ;
- répondre, lorsque nécessaire, aux questionnements de la MOE en matière de FOH.

Dans le cas du représentant FOH précité, l'IRSN observe que ses activités consistent pour l'essentiel à s'assurer de la transposition des résultats des analyses FOH en exigences par la MOE et de leur intégration par les responsables techniques des différents lots de la MOE mais que ces activités sont conduites en parallèle des réflexions menées au sein de la cellule d'exploitation, sans que soient prévus suffisamment d'échanges approfondis entre ces acteurs. Pourtant, la cellule d'exploitation est un acteur clé dans l'expression des besoins d'exploitation et la réalisation d'arbitrages en la matière (cf. *supra*). En conséquence, l'IRSN estime que l'Andra devrait consolider l'organisation interne à la MOA en veillant à ce que les missions confiées au référent FOH et les modalités d'échanges avec la cellule d'exploitation soient de nature à renforcer la prise en compte du travail futur d'exploitation dans les décisions et les arbitrages effectués au sein du projet.

Enfin, l'Andra présente l'approche qu'elle retient pour anticiper le travail futur et maîtriser les risques qui lui sont associés. Celle-ci se fonde sur l'exploitation d'un retour d'expérience que l'Andra a détaillé (exploitation de ses propres installations, d'installations présentant des similitudes avec Cigéo, en France ou à l'étranger). A titre d'exemple, la Cellule d'Exploitation est informée de tous les incidents se produisant sur les sites de l'Andra. Ceci relève, selon l'IRSN, d'une bonne pratique. Cette approche, formalisée par la MOE dans son plan de management FOH [235], se fonde également sur une analyse approfondie de l'activité humaine dans les situations existantes ainsi que sur une mise à l'épreuve à l'aide de moyens de simulation des options techniques et organisationnelles

envisagées. Ces principes apparaissent cohérents avec l'état de l'art des pratiques en termes de maîtrise des risques dans les installations nucléaires, **ce qui est satisfaisant.**

Toutefois, le plan de management FOH [235] décrit l'approche FOH mise en œuvre par la MOE pour la phase d'esquisse, aujourd'hui révolue, mais ne comporte aucune information portant sur les phases d'APS et d'APD. Concernant l'identification des opérations sensibles pour la sûreté, la MOE FOH a indiqué qu'en fin d'APS, chaque sous-système a présenté une liste d'activités sensibles candidates (par exemple : contrôles destructifs sur les cellules, remplacement des filtres THE, maintenance des freins du funiculaire). A ce stade d'avancement de la conception, l'IRSN considère que l'Andra dispose des éléments nécessaires pour identifier les situations de travail futures en fonctionnement normal, incidentel ou accidentel et parmi celles-ci, les activités sensibles du point de vue de la sûreté. A cet égard, l'Andra ayant fait le choix de fonder la conception des systèmes et des équipements sur l'automatisation des opérations de transfert et de mise en alvéoles de stockage, l'IRSN estime que le recensement doit porter plus particulièrement sur les activités de surveillance des installations et de maintien en condition opérationnelle des équipements. De plus, la conception de l'exploitation future de Cigéo relève de plusieurs lots techniques, ce qui peut entraîner des incohérences et conduire à des difficultés d'exploitation. Pour l'IRSN, l'expérience des projets de conception montre que le recensement détaillé des situations de travail futures constitue une référence commune à l'ensemble des acteurs du projet, qui est de nature à favoriser la cohérence des choix de conception entre les différents sous-systèmes concernés.

Aussi, l'IRSN estime que l'Andra devra compléter son plan de management pour préciser les actions FOH qui seront menées lors des différentes phases à venir du projet et présenter, dans le dossier accompagnant la DAC, les opérations sensibles pour la sûreté et la radioprotection et les dispositions d'ordre technique, humain et organisationnel prévues pour limiter les conséquences des défaillances potentielles d'origine humaine et technique, lorsque ces dernières doivent être corrigées par les opérateurs eux-mêmes, incluant pour chacune d'entre elles les éléments de justification suivants :

- l'ensemble des acteurs (rôles et responsabilités) susceptibles d'être mobilisés au fur et à mesure de la préparation et de la réalisation d'une activité d'exploitation ;
- les exigences particulières de réalisation des actions telles que la précision ou la rapidité d'exécution des actions ;
- les moyens et conditions d'interventions ;
- les défaillances potentielles d'origine humaine et leurs conséquences pour la sûreté et la radioprotection ;
- le programme FOH prévu pour valider les dispositions d'ordre technique, humain et organisationnel dans les phases à venir du projet.

Ce point fait l'objet de l'engagement E51-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

Ces éléments devraient permettre de solder la demande de l'ASN 2014 D34, relative à la présentation, dans le DOS, des principes mis en œuvre dans le cadre de la démarche de conception, pour prendre en compte les besoins des futurs intervenants et de la future organisation dans les choix de conception, en considérant les phases de construction et de fonctionnement de l'installation.

Par ailleurs, l'Andra et la MOE ont indiqué au cours de l'instruction que ni le représentant FOH de la MOA ni les spécialistes FOH de la MOE ne sont impliqués dans les réflexions portant sur le dimensionnement des effectifs. Or,

L'IRSN estime que ce sujet influe sur la robustesse de l'exploitation future et ne saurait être pensé indépendamment des connaissances sur le travail. En particulier, l'intérêt du travail des spécialistes FOH sur ce sujet consiste à identifier des situations d'exploitation que les opérateurs pourraient avoir à gérer dans le futur, dans les différents états de fonctionnement de l'installation et de tester la robustesse des hypothèses de dimensionnement dans des situations d'exploitation différentes. De plus, ces données sont utiles non seulement pour la répartition des rôles entre les acteurs présents en salle de commande mais aussi pour l'identification des informations et moyens de commande nécessaires, et par voie de conséquence, aux choix de spécialisation ou banalisation des postes de travail en salle de commande.

De plus, l'Andra propose, pour orienter ses choix en matière d'externalisation d'activités d'exploitation, d'identifier des activités stratégiques « cœurs de métier » qui ne pourraient pas être sous-traitées et en mentionne quelques exemples, tels que : la surveillance des AIP, la surveillance de la qualité des colis à stocker, la sûreté des installations, l'exploitation du procédé de stockage, la surveillance de l'installation. Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué que les réflexions n'étaient pas avancées en la matière. L'Andra a toutefois précisé qu'une démarche similaire ayant été utilisée par AREVA à la Hague, le retour d'expérience de cette dernière ferait partie des éléments d'analyse demandés par l'Andra dans le futur contrat cadre avec AREVA. Comme indiqué précédemment, l'IRSN estime pertinent de mobiliser le retour d'expérience sur ce sujet. Toutefois, comme les spécialistes FOH ont également engagé des analyses des activités sensibles pour la sûreté, l'IRSN estime que l'Andra devrait les intégrer dans ce travail de réflexion sur les choix d'externalisation.

Aussi, l'IRSN estime que l'Andra devrait intégrer les spécialistes FOH dans les réflexions en matière de dimensionnement des effectifs et d'externalisation des activités d'exploitation de façon à fiabiliser l'exploitation future de Cigéo.

7.2.7 COACTIVITE

L'IRSN rappelle qu'au cours des précédentes évaluations liées au projet Cigéo, les risques liés à la coactivité ont été identifiés comme une spécificité dudit projet, eu égard aux caractéristiques particulières de l'installation souterraine. A cet égard, de nombreux engagements de l'Andra et demandes de l'ASN éclairent les avancées attendues au stade du DOS. De cet avancement et des engagements et demandes précitées, l'IRSN retient les éléments suivants.

L'Andra indique [39] que, pour Cigéo, quatre type de coactivité spécifiques sont étudiés, à savoir (i) la réalisation simultanée d'activités d'exploitation nucléaire⁷¹ et de construction d'ouvrages, (ii) la réalisation d'activités simultanées d'exploitation nucléaire et d'opérations de maintenance, (iii) la réalisation d'activités simultanées d'exploitation nucléaire et d'opérations de réfections et de maintenance lourde (activités de jouvence) et (iv) la réalisation d'activités simultanées d'exploitation nucléaire et de fermeture des alvéoles de stockage.

Coactivité entre la zone nucléaire et la zone travaux

L'Andra identifie [39] deux grandes catégories de risques potentiels liés à la coactivité, à savoir :

- les risques résultant des activités de creusement, d'équipement et de soutien d'une zone en chantier vers une zone en exploitation et principalement :

⁷¹ Les activités d'exploitation nucléaire correspondent aux activités de mise en stockage des colis

- un incendie dû à des opérations avec points chauds sur les chantiers et à la présence d'engins contenant du carburant et des pneumatiques, susceptible de se propager et d'agresser les séparations des zones situées à proximité,
- des projectiles consécutifs à une explosion liée à la présence de zones ATEX (entreposage de liquides inflammables, présence de bouteilles sous pression, de locaux de charge des batteries),
- la chute d'équipements ou des collisions d'engins de chantiers pouvant dégrader la performance des interfaces avec la zone nucléaire,
- les pertes d'utilités, de ventilation ou des réseaux de détection et de surveillance lors d'installation, d'essai ou de mise en service de nouveaux équipements (zone de basculement de la zone travaux vers la zone nucléaire),
- les risques propres aux activités d'exploitation concomitante avec d'autres activités périphériques ou supports au procédé principal de manutention de colis de déchets :
 - des risques de dissémination de substances radioactives vers la zone travaux,
 - des risques d'exposition externe du personnel de la zone travaux suite à un accident dans la zone nucléaire (incendie, collision...) ou à une dégradation d'une protection radiologique à proximité de la zone travaux,
 - des risques de collision ou de blocage du procédé nucléaire liés au croisement de flux en [ZSL](#) et en galeries de liaisons lors d'opérations de maintenance ou de phases de jouvence,
 - la chute d'équipements ainsi que la collision d'engins utilisés pour les opérations en zone nucléaire pouvant impacter le confinement statique ou dynamique de la zone nucléaire, les protections radiologiques et autres éléments de sécurité (portes, secteurs de feu, clapets coupe-feu...) situés aux interfaces avec la zone travaux,
 - les risques [FOH](#) générés par la circulation des matériels et personnes à proximité des interfaces, notamment en lien avec les essais nécessaires lors du basculement d'une portion d'alvéoles depuis la zone travaux vers la zone nucléaire.

Comme dans le dossier « Maîtrise des risques en exploitation », l'Andra retient le principe de séparations physiques entre la zone nucléaire et la zone travaux, celles-ci étant constituées de « sas » qui contribuent à la délimitation des volumes ventilés par les réseaux de la ventilation nucléaire et de la ventilation conventionnelle. L'IRSN relève que depuis le dossier « 2009 », le nombre de séparations physiques a diminué. **L'IRSN estime, comme lors de l'examen du dossier « Maîtrise des risques en exploitation » que l'Andra est bien dans une démarche de minimisation du nombre de séparations physiques entre les zones nucléaire et travaux et considère que l'engagement 2010 E11.2 [1] relatif à la justification du positionnement et du nombre de sas marquant la séparation physique entre la zone nucléaire et la zone travaux peut être soldé.**

L'Andra précise [39] que ces séparations doivent (i) présenter une résistance et une réaction au feu REI 120, (ii) être étanches pour empêcher la propagation d'eau, d'une zone à l'autre en cas d'inondation d'origine interne, (iii) être protégées contre les chocs et collisions d'engins ou de véhicules et (iv) être déconstructibles pour permettre l'extension de la zone exploitée après les essais de qualification. L'Andra a précisé au cours de l'instruction que la mise en surpression du sas était également une exigence de conception et que, par ailleurs, l'objectif était de

respecter également une valeur de 80 µSv sur un mois dans la zone travaux, celle-ci étant une zone non réglementée. A cet égard, l'Andra présentera les éléments de justification dans le cadre de la DAC.

S'agissant des dispositions vis-à-vis du risque incendie des séparations physiques entre la zone nucléaire et la zone travaux, l'Andra retient [39], outre la résistance et la réaction au feu des séparations précitées, la limitation des puissances thermiques des engins et équipements proches de cette interface (distance d'éloignement par rapport à la séparation d'au moins 30 mètres avec mise en place de barrières physiques) afin de limiter les effets d'un incendie en zone travaux sur la zone nucléaire. En outre, l'Andra précise que d'une part tout véhicule présentant un potentiel calorifique significatif sera équipé d'une extinction automatique incendie embarquée couplée à une détection incendie et d'autre part que les véhicules seront équipés d'extincteurs portatifs en nombre suffisant. **Ces principes n'appellent pas de remarque de la part de l'IRSN à ce stade.**

Néanmoins, l'IRSN note que si l'Andra a identifié, parmi les risques d'agression des séparations physiques côté zone travaux, les projectiles suite à une explosion liée à la présence de zones ATEX, elle ne présente pas d'exigence ni de disposition de prévention et/ou de limitation des conséquences d'un tel scénario. Or l'IRSN estime qu'une dégradation significative de ces interfaces pourrait constituer un aggravant de nature à compromettre des actions essentielles en cas de sinistre dans les installations souterraines, telles que par exemple l'évacuation du personnel ou l'intervention des secours.

Aussi l'Andra devra présenter, dans le dossier de DAC, l'analyse des risques d'explosion au niveau des séparations physiques de l'installation souterraine et les dispositions de prévention et de limitation des conséquences associées ainsi que leurs exigences. Ce point fait l'objet de l'engagement E52-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

S'agissant des séparations physiques évolutives qui suivent le déploiement de l'installation souterraine au niveau des galeries d'accès HA et des galeries de liaison MAVL, l'Andra précise que les dispositions prévues pour l'extension de la zone nucléaire sont un enchaînement d'opérations où elle prévoit (i) des essais statiques de vérification de fin de montage, le raccordement au réseau HTA⁷² de la zone nucléaire et les essais et qualifications de bon fonctionnement des composants et sous-systèmes des ouvrages de la phase à déployer, (ii) la construction, depuis la zone travaux, de séparations physiques entre les ouvrages de la phase à déployer et la zone travaux, (iii) la dépose des dispositifs provisoires, le raccordement des nouveaux tronçons de réseaux (ventilation, fluides...), la migration logicielle des nouveaux équipements de la zone d'exploitation étendue en salle de conduite (iv) la dépose des séparations physiques entre les ouvrages de la phase à déployer et la zone nucléaire et (v) la réalisation des essais de bon fonctionnement global de l'installation en configuration définitive en inactif. L'Andra précise que la dépose des séparations physiques entre les ouvrages de la phase à déployer et la zone nucléaire et les essais de bon fonctionnement global de l'installation pourraient être réalisés avec arrêt de l'exploitation, c'est-à-dire sans opération de mise en stockage de colis dans la zone déployée. **L'IRSN estime que les principes présentés par l'Andra sont satisfaisants, en particulier ce dernier point sensible.** Néanmoins, l'IRSN note que l'Andra ne précise pas, à ce stade, les dispositions prises notamment vis-à-vis de la ventilation lors du raccordement de l'extraction des nouvelles galeries MAVL, qui constitue une autre activité particulièrement sensible au regard des risques liés à la coactivité. L'Andra a précisé, lors de la réunion préparatoire, que les dispositions prévues pour l'extension de la

⁷² Le réseau HTA (Haute Tension A) qui concerne les installations électriques pour lesquelles la tension excède 1 000 V sans dépasser 50 000 V en courant alternatif ou excède 1 500 V sans dépasser 75 000 V en courant continu.

zone nucléaire présentées ci-avant étaient également valables pour l'extension de la zone nucléaire située au niveau de la galerie de retour d'air. L'IRSN estime que ces principes sont satisfaisants et qu'ils devront être développés dans le cadre du traitement de l'engagement 2010 E11.3 visant à justifier les options de conception et les options de sûreté relatives aux galeries de retour d'air des sous-zones de stockage MAVL qui permettent de maîtriser les risques liés à la coactivité, dans la zone nucléaire (gaine) et dans la zone de travaux (galeries).

Enfin, comme dans le dossier « Maîtrise des risques en exploitation », l'Andra retient [39] la possibilité d'utiliser les séparations physiques en situation incidentelle ou accidentelle. Pour les configurations de galeries bitubes, comme les galeries de liaison MAVL et HA, l'Andra envisage la mise en place d'un sas pour que les services de secours (intervention ou évacuation) soient en mesure d'accéder aux galeries d'exploitation depuis une galerie en zone travaux et, pour les configurations monotubes, comme les galeries de retour d'air, l'interface sera composée d'un sas franchissable par un véhicule de secours afin de permettre de respecter l'exigence de disposer de deux points d'accès pour les équipes d'intervention. Dans les deux cas, l'Andra précise que ces sas doivent respecter les exigences de protection physique⁷³. A cet égard, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que le franchissement de ces séparations était une opération rare permettant de gérer une situation accidentelle exceptionnelle. Elle a également indiqué que les rondiers ne pourraient pas franchir ces séparations en fonctionnement normal de l'installation. L'IRSN rappelle que l'Andra s'est engagée à présenter, dans le dossier de DAC, les dispositions techniques et organisationnelles retenues afin de garantir à la fois le maintien des séparations physiques en position fermée en situation normale et le franchissement aisé de ces séparations en situation d'intervention lorsque nécessaire (engagement 2014 E11). A cet égard, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que ces dispositions n'étaient pas définies précisément au stade du DOS.

En particulier, l'Andra indique [39] que le cheminement des véhicules d'intervention, dans la zone travaux, ne doit pas être gêné par la présence d'obstacles et retient notamment une limitation des zones de stockage temporaire dans les recoupes et une délimitation de ces zones, ainsi que l'autorisation de stationnement des engins sur un seul côté. S'agissant de la zone nucléaire, l'Andra précise que l'accès des véhicules se fait en utilisant lorsque nécessaire les recoupes franchissables par un véhicule incendie et que dans les galeries d'accès HA et les galeries de liaison MAVL, des dispositions seront prises afin de déplacer la navette ou le chariot après déclenchement d'une alarme feu afin de libérer les accès. A cet égard, l'IRSN rappelle que l'Andra s'est engagée à présenter, dans le dossier de DAC, les dispositions techniques et organisationnelles retenues afin de s'assurer que les moyens d'intervention pourront atteindre un éventuel sinistre dans un délai compatible avec les objectifs retenus, notamment en tenant compte des cas d'encombrement envisageables (engagement 2014 E12). **L'IRSN note que sur ce point l'Andra a avancé dans sa démarche avec la présentation de dispositions pour limiter l'encombrement dans les zones travaux et nucléaire et rappelle que l'Andra devra présenter l'ensemble des dispositions techniques et organisationnelles retenues dans le dossier de DAC.**

⁷³ Les exigences de protection physique renvoient à l'ensemble des dispositifs et procédures déployés par l'exploitant d'une installation nucléaire de base pour assurer la protection des cibles contre des actes de malveillance susceptibles de conduire à un vol ou un détournement de matière radioactive ou à des conséquences radiologiques (cf. arrêté du 10 juin 2011 relatif à la protection physique des installations abritant des matières nucléaires dont la détention relève d'une autorisation).

Coactivité au sein de la zone nucléaire

S'agissant de la coactivité entre les opérations d'exploitation nucléaire et de maintenance préventive, l'Andra indique [39] d'une part que les opérations de contrôles réglementaires, d'essais périodiques de maintenance préventive seront planifiées à l'avance, d'autre part que les vérifications réglementaires de périodicités mensuelle et trimestrielle seront réalisées en dehors des horaires d'exploitation. En outre, elle précise que les opérations de périodicités semestrielle et annuelle auront lieu pendant les semaines d'arrêt de fonctionnement de l'installation, ainsi, l'ensemble du procédé nucléaire sera à l'arrêt et les colis de stockage seront en attente dans les locaux dédiés des installations de surface. Pour ce qui concerne la maintenance curative, l'Andra indique [39] que ces opérations sont imprévisibles et entraîneront, dans certains cas, l'arrêt de l'exploitation ; une analyse des risques spécifiques sera réalisée avant chaque intervention afin de procéder à la mise en place de mesures de prévention et de protection adéquates. L'Andra précise [39] que, dans l'installation souterraine, lorsque les opérations de maintenance préventive ou curative sont réalisées sans interrompre l'exploitation, les flux de personnes et d'équipements pour la maintenance peuvent emprunter le même trajet que les colis de stockage, notamment au niveau des galeries de liaison et d'accès. Elle indique que, dans ce cas, les dispositions de prévention des risques liés à la coactivité sont (i) une limitation des vitesses des navettes et chariots de fond, (ii) la mise en place de dispositifs de géolocalisation sur les hottes, ainsi qu'une signalisation visuelle et sonore afin d'avertir le personnel de la présence d'un colis de stockage en cours de transfert, (iii) la mise en place de cheminements séparés et protégés ou de marquages au sol pour la circulation du personnel et (iv) l'utilisation de la descenderie de service pour l'acheminement des matériels de maintenance, celle-ci étant séparée et indépendante de la descenderie colis. Enfin, l'Andra indique [39] que le phasage des opérations de maintenance lourde ou de jouvence, prévues tous les 10, 20 et 40 ans, permettra de réaliser les opérations de réfection et de rénovation en interrompant le procédé principal de conditionnement et de transfert des colis de stockage et que celles-ci seront planifiées entre les différentes parties de l'installation afin de limiter les arrêts d'exploitation. **Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN à ce stade.**

S'agissant des risques liés à la coactivité d'exploitation et d'opérations de fermeture, l'Andra indique [39] que bien que ces opérations soient concomitantes dans le temps, elles sont séparées dans l'espace. En effet, l'Andra identifie deux situations que sont (i) la fermeture de la zone HA0 et la mise en stockage des colis MAVL et (ii) la fermeture de la zone MAVL et la mise en stockage des colis HA1/HA2. Elle précise que ces opérations concomitantes nécessitent la mise en place d'une gestion coordonnée des flux de véhicules utilisés pour la fermeture et des flux de véhicules utilisés pour la mise en stockage. Elle indique également que des cheminements alternatifs pourraient être envisagés, comme l'ajout de galeries ou la modification de l'infrastructure initialement prévue, dans le but d'éviter le passage des flux de fermeture au niveau de la ZSL exploitation ou des galeries en même temps que les activités de stockage. Ainsi l'Andra prévoit la réalisation des opérations de fermeture dans des espaces de travail provisoires permettant d'effectuer ces opérations de manière indépendante du reste de l'installation. Elle précise que les dispositions retenues au stade du DOS visent à doubler les réseaux à démanteler, comme la ventilation ou l'extraction des fumées, par un nouveau réseau de « chantier » et que la ventilation de cet espace sera adaptée aux conditions du chantier, en particulier en termes d'empoussièrement et d'évacuation des calories et qu'une filtration dédiée permettra de limiter l'espace confiné ainsi ventilé, avant refoulement en pleine section de la galerie de liaison ou de la galerie de retour d'air.

L'IRSN note les avancées notables de l'Andra en matière d'intégration des risques liés à la coactivité au sein de la zone nucléaire que ce soit pour la maintenance préventive, la maintenance curative, les opérations de jouvence ou de maintenance lourde et les opérations de fermeture. **A cet égard, l'IRSN considère que la prise en compte de ces activités dans le domaine de fonctionnement normal de l'installation, qui constitue un engagement de l'Andra, devra être présentée dans le cadre de la DAC, notamment eu égard aux points soulignés par les engagements et demandes toujours d'actualité (engagements, demandes et recommandations 2010 E11.1, 2010 E11.3, 2010 E11.4, 2011 R19, 2015 D9, 2014 E11 et 2014-E12 [1]).**

7.2.8 PERTE D'AUXILIAIRES

Pour ce qui concerne les risques liés à la perte d'alimentation électrique, l'Andra présente leurs origines, les fonctions impactées (essentiellement la ventilation, les moyens de transfert des colis, les éléments de sûreté liés à la maîtrise des risques liés à l'incendie (clapets coupe feu, portes, système d'extinction...) et les moyens de surveillance de l'installation. **L'IRSN n'a pas de commentaire particulier à ce stade.** L'Andra décrit ensuite les dispositions de prévention, de surveillance et de limitation de conséquences qu'elle retient. S'agissant des premières, la principale disposition, reconduite depuis le « Dossier 2009 », consiste en la mise en œuvre de deux voies séparées physiquement et électriquement (principe de redondance et d'indépendance), depuis l'alimentation depuis le réseau extérieur jusqu'aux équipements du réseau électrique de l'installation. De plus, une alimentation de secours est prévue pour suppléer une perte de l'alimentation normale d'équipements importants pour la sûreté, tels que les engins de manutention pouvant maintenir une charge en hauteur (ponts et élévateurs) ceux participant à la ventilation nucléaire (notamment des alvéoles MAVL), à la détection/extinction automatique incendie et à la surveillance (rejets, hydrogène, filtres THE). **L'IRSN estime satisfaisantes les dispositions de surveillance et de limitation des conséquences d'une perte d'alimentation électrique, plus fournies qu'au stade des précédents dossiers.**

S'agissant de la perte d'alimentation en air comprimé, celui-ci joue un rôle dans des phases importantes de transfert des colis : à l'accostage des hottes MAVL sur la porte de la cellule de manutention des alvéoles MAVL et afin de permettre au « robot-pousseur » de s'agripper aux parois du chemisage des alvéoles HA pour avancer ou reculer. Dans le premier cas, le maintien du confinement entre hotte et alvéole MAVL en cas de perte de l'alimentation en air comprimé fait l'objet de l'engagement E41-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017 relatif aux performances de confinement de l'ensemble des éléments de la façade d'accostage dans toutes les situations de fonctionnement (cf. chapitre 7.2.1.6). Dans le second cas, l'Andra retient d'évacuer le robot vers l'extérieur de l'alvéole, de laisser le colis en place quelle que soit sa position, et de refermer l'alvéole en attendant de récupérer l'alimentation en air comprimé pour reprendre le procédé de mise en stockage. **L'IRSN estime satisfaisant ce principe qui revient au maintien du colis et de l'installation dans une position sûre en cas de perte de l'alimentation en air comprimé.**

S'agissant de la perte d'approvisionnement en eau nécessaire à l'extinction incendie dans les ouvrages souterrains, l'Andra retient le maintien de la disponibilité en eau en cas de perte, assurée par la redondance des sources, des réserves et des réseaux d'eau dans l'installation de surface et l'installation souterraine. **L'IRSN n'a pas de commentaire sur ce point.**

Pour ce qui concerne les conséquences d'une perte de la ventilation, l'Andra indique [39] que les dispositions de prévention d'une telle situation reposent notamment sur l'architecture de la ventilation (indépendance des réseaux

de ventilation, redondance des ventilateurs, de la filtration, et de l'alimentation électrique) et que les dispositions de surveillance (contrôle du bon fonctionnement et suivi de l'évolution des paramètres) et de limitation des conséquences (arrêt et mise à l'état sûr du procédé, fermeture des clapets, maintien en confinement statique, présence de ventilateurs de secours mobiles) permettent de pallier les dysfonctionnements liés à l'arrêt de la ventilation. A cet égard, elle précise qu'en cas d'arrêt de la ventilation (i) le confinement statique est assuré par les cellules et les locaux, (ii) le risque lié à l'explosion d'hydrogène de radiolyse reste maîtrisé pendant un délai de 5 semaines, (iii) la maîtrise des risques liés aux dégagements thermiques n'est pas impactée et (iv) la surveillance de l'installation est assurée car les systèmes de détection et d'alarme restent alimentés par des onduleurs le temps de rétablissement de l'alimentation électrique. Elle en conclut que l'arrêt de la ventilation n'a pas d'impact sur le maintien en état sûr de l'installation. Outre les conclusions de l'IRSN relatives à la maîtrise des risques liés à l'explosion d'hydrogène de radiolyse présentées dans le chapitre 7.2.2.1, l'IRSN rappelle, comme présenté au chapitre 7.1.2, que l'Andra prévoit une surveillance de la contamination atmosphérique dans les locaux à risques de contamination incidentelle qui consiste notamment en des prélèvements dans les gaines d'extraction de la ventilation. L'IRSN estime qu'en cas de perte de la ventilation, cette surveillance de la contamination atmosphérique dans les gaines d'extraction ne sera pas assurée et ce même si les dispositifs restent alimentés par des onduleurs. En effet, en cas de perte de la ventilation, les flux d'air ne passant plus dans les gaines d'extraction, les dispositifs mis en place dans ces gaines ne détecteraient pas une contamination dans les locaux.

Aussi, l'IRSN estime que l'Andra devra prendre en compte, dans le dossier de DAC, la possibilité d'une défaillance du système de ventilation dans le choix du positionnement des dispositifs de surveillance de la contamination atmosphérique pour les locaux à risque. Ce point fait l'objet de l'engagement E53-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

Ce nouvel engagement remplace et complète l'engagement 2010 E12 [1] qui peut être considéré comme soldé.

7.2.9 VIEILLISSEMENT ET MAINTENANCE

L'Andra définit le vieillissement [39] comme « *la transformation ou la modification que subit un ouvrage ou un équipement par le simple effet du temps ou par l'effet des conditions auxquelles il est soumis* ». Bien que cette définition se limite au seul aspect « physique » du phénomène, l'IRSN précise que l'Andra prend également en compte d'autres aspects tels que l'obsolescence prévue des équipements (*i.e.* le fait que ceux-ci devraient se périmenter par rapport à des connaissances, normes ou technologies plus récentes) ainsi que des aspects non techniques (humains, organisationnels, gestion des connaissances, etc.).

L'Andra se réfère à l'[avis technique n°15 du CSIN](#) (Comité sur la Sûreté des Installations Nucléaires, AEN) émis en 2012 et relatif à la gestion du vieillissement des installations du cycle du combustible nucléaire pour en retenir les bonnes pratiques et élaborer les principes de gestion du vieillissement qui seront appliqués à Cigéo. Cet avis présente notamment les bonnes pratiques eu égard aux mesures à envisager pour gérer le vieillissement (par exemple l'irradiation, la corrosion, la température...).

Les grands principes retenus par l'Andra [39] pour gérer le vieillissement attendu dans Cigéo se décomposent suivant les trois phases de vie suivantes de l'installation : (i) conception, (ii) construction, mise en service et (iii) exploitation. Pour ce qui concerne la phase de conception, la stratégie de l'Andra consiste à identifier les structures, systèmes et composants (SSC) importants pour la sûreté et à anticiper leur altération en tenant compte des spécificités liées aux installations de surface, aux ouvrages souterrains et aux zones accessibles ou non. La

conception des SSC suit ensuite différentes étapes parmi lesquelles : la mise à profit du retour d'expérience issu des installations d'entreposage et des programmes de recherche, le choix de matériaux présentant une meilleure résistance aux effets du vieillissement, des marges de dimensionnement suffisantes, la réduction au strict minimum des équipements impossibles à contrôler ou à entretenir, etc. Pour ce qui concerne la phase de construction et de mise en service, l'Andra souligne l'importance d'une bonne identification des conditions de fonctionnement des équipements et de la vérification de leur conformité une fois fabriqués et prévoit la mise en place d'une gestion de la documentation technique (enregistrements d'assurance qualité, justifications de sûreté...). Enfin concernant la phase d'exploitation, l'Andra indique qu'« *un programme d'essais périodiques et de maintenance des équipements sera établi et mis en œuvre conformément au dossier de sûreté* » et des dispositions relatives à la gestion de l'obsolescence prévue de certains équipements (électriques, électroniques...) ainsi que d'aspects non techniques (cf. *supra*). **L'IRSN constate que les grands principes retenus par l'Andra pour gérer le vieillissement attendu de Cigéo s'inspirent directement de l'avis technique du CSIN, ce qui est satisfaisant.**

L'Andra [39] présente également des éléments plus concrets relatifs à des SSC qui ne sont pas conçus pour être remplacés intégralement mais seulement entretenus : le génie civil et certains équipements en alvéoles tels que les rails du pont stockeur en alvéole MAVL. Ces SSC sont particulièrement importants pour permettre la mise en place ou le retrait des colis pendant la période de réversibilité. Sur la durée de vie des deux installations de surface (EP1 et EP2), de 60 à 70 ans chacune, l'Andra précise les jouvences prévues en lien notamment avec la gestion du vieillissement. L'Andra rappelle que les INB sont soumises à des révisions décennales et indique des fréquences prévues à ce stade pour les opérations de jouvence de certains équipements : 10/20 ans pour le second œuvre, 20 ans pour le contrôle-commande, 30 ans pour des équipements particulièrement sollicités (e.g. poste de colilage HA), 40 ans pour les gros équipements (chariots, ventilateurs...), etc. L'Andra prévoit également, en complément des jouvences planifiées et des contrôles réalisés dans le cadre de la maintenance préventive, des dispositions de surveillance pour détecter tout vieillissement précoce des matériaux et équipements. **L'IRSN note que l'Andra a entamé les réflexions nécessaires à la mise en pratique de sa stratégie de gestion du vieillissement, notamment pour ce qui concerne le génie civil et les équipements en alvéoles qui ne sont pas conçus pour être remplacés, ce qui est satisfaisant à ce stade.**

Aussi, l'IRSN estime soldé l'engagement 2010 E3.1 [1] relatif à la méthode de prise en compte du vieillissement des composants. Cependant, **l'IRSN estime que l'Andra devra apporter pour la DAC des précisions quant aux dispositions qui seront prises pour gérer le vieillissement prévu de certains équipements, eu égard à la durée d'exploitation de Cigéo.** A cet égard, l'IRSN souligne notamment l'importance des aspects relatifs à l'évolution des bétons bas pH pendant la phase d'exploitation (carbonatation, tenue mécanique des ouvrages de soutènement/revêtement...) qui est examinée au chapitre 5.3 du présent rapport. Il convient de souligner également que le vieillissement des composants constitue une thématique de R&D dont la poursuite a été encouragée à l'automne 2016 par la revue du groupe d'experts mandatés par l'AIEA [8].

L'IRSN observe par ailleurs que le vieillissement de certains matériels (par exemple les matériels électriques de type câbles) pourrait mener à rendre inopérant des équipements importants pour la sûreté de l'installation, tels que ceux dédiés à la détection, à la surveillance... De ce fait, l'IRSN souligne la nécessité de prévoir, dès la conception de l'installation, des dispositions permettant une maintenance et un remplacement aisé de ces matériels et attire en particulier l'attention sur les câbles dont le cheminement serait prévu dans le radier des installations souterraines et de la descenderie. Si vis-à-vis des risques liés à l'incendie, le cheminement sous le radier est une disposition

satisfaisante, celui-ci devra néanmoins être conçu pour permettre l'éventuel remplacement des câbles. En conséquence, l'IRSN estime que la conception des systèmes électriques doit intégrer la possibilité de maintenance et de remplacement des matériels qui les composent. Plus généralement, le remplacement des équipements ou de simples pièces nécessite de prévoir à l'avance des pièces de rechange dans un espace dédié, attaché à l'INB, dans lequel le mode de conservation aura été réfléchi.

L'une des spécificités du projet Cigéo est de comporter des ouvrages et équipements dits « non accessibles » que l'Andra définit comme « *les zones dans lesquelles une présence permanente et définitive de déchets radioactifs est prévue : essentiellement les alvéoles de stockage et les conteneurs de stockage* ». Au-delà des précautions que l'Andra prévoit de prendre lors de leur conception (marges de dimensionnement, choix des matériaux, maîtrise des conditions d'ambiance...), l'IRSN estime que la surveillance et l'entretien de ces ouvrages et équipements dits « non accessibles » sur une période d'exploitation de l'ordre de cent ans pourrait être particulièrement difficile. À cet égard, l'Andra indique [39] que concernant le génie civil des alvéoles MAVL ainsi que les rails et supports du pont stockeur, un contrôle visuel sera réalisé « *à l'aide d'un équipement vidéo robotisé au cours des visites décennales* » ; pour ce qui concerne les alvéoles HA, « *l'évolution de l'intérieur du chemisage peut être aussi surveillée à l'aide d'un équipement vidéo robotisé* » ; la surveillance de l'évolution des colis de stockage pourra quant à elle « *être réalisée soit visuellement à l'aide de moyens robotisés introduits dans les alvéoles de stockage ou après leur retrait de l'alvéole, soit au moyen de piquages dans le système de ventilation situés en aval de l'alvéole MAVL, soit après collecte au niveau de la galerie d'accès de l'atmosphère de l'alvéole HA* ». Enfin, comme indiqué au chapitre 7.2.4.1 du présent rapport, l'Andra a précisé qu'un robot d'intervention-inspection, destiné au nettoyage des voies de roulement du pont stockeur dans les alvéoles MAVL, était à l'étude. L'IRSN constate qu'à ce stade, l'Andra présente des solutions possibles pour observer le génie civil ou la voie de roulement du pont stockeur d'un alvéole MAVL actif mais ne présente pas de moyen qui lui permettrait d'intervenir sur un désordre constaté.

Aussi, l'IRSN considère que l'Andra devra présenter, dans le dossier de DAC, les moyens destinés aux opérations de surveillance et de maintenance en alvéole MAVL et justifier leur faisabilité technique. Ce point fait l'objet de l'engagement E54-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

Enfin, concernant les éléments importants pour la protection (EIP) passifs qui ne pourront pas faire l'objet de maintenance ou de contrôles (impossibilité d'accès par exemple), le DOS indique que leur qualification initiale apportera, avec un degré de confiance suffisant pendant la durée nécessaire définie dans la démonstration, la garantie du respect des exigences définies. L'IRSN observe cependant que l'Andra ne précise pas à ce stade les exigences de conception des EIP qu'elle retient pour tenir compte de la durée séculaire d'exploitation des installations de surface de Cigéo. L'IRSN rappelle sa conclusion relative à la présentation des dispositions retenues à la conception permettant de justifier du maintien de la qualification des EIP au regard de leurs durées et de leurs conditions de service, qui fait l'objet de l'engagement E28-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017 présenté au chapitre 6.1.5.3.

7.3 AGRESSIONS D'ORIGINE EXTERNE

7.3.1 SEISMES

Les risques d'origine sismique peuvent mener à l'endommagement, voire la ruine des bâtiments, des ouvrages ou des équipements (par exemple, engins de manutention transférant des charges sensibles) de l'installation, en les agressant directement ou par des agressions induites (projectile, chute...). La détermination d'un spectre sismique (*i.e.*, accélérations en fonction des fréquences) permettant d'identifier l'aléa à considérer constitue la première étape de la démonstration de la tenue des structures et des composants jouant un rôle important pour la sûreté de l'installation. La seconde étape consiste en le dimensionnement de **Cigéo** en regard de l'aléa retenu (« spectre de dimensionnement »).

Pour la détermination de l'aléa sismique, il convient de rappeler que la règle fondamentale de sûreté **RFS 2001-01** [99] précise notamment la méthodologie déterministe⁷⁴ pour identifier les "Séismes Maximaux Historiquement Vraisemblables" (**SMHV**) du site dans le catalogue de sismicité historique, comment en déduire le "Séisme Majoré de Sécurité" (**SMS**) puis le spectre du **SMS** ; la **RFS 2001-01** stipule également que le spectre retenu par l'exploitant pour le dimensionnement de son installation ne pourra pas être inférieur à un spectre minimal forfaitaire (**SMF**), calé en accélération à $0,1 \text{ g}^{75}$ à la fréquence infinie.

Le présent chapitre porte, dans une première partie, sur la détermination de l'aléa sismique pour la phase d'exploitation et, dans une seconde partie, sur le dimensionnement sismique de **Cigéo**.

7.3.1.1 Détermination de l'aléa sismique pour la phase d'exploitation

Pour ce qui concerne l'estimation de l'aléa sismique pour les installations de surface de **Cigéo**, l'Andra indique que le « spectre de dimensionnement » pris en compte pour la phase d'exploitation au stade du **DOS** est un spectre probabiliste médian de période de retour 10 000 ans provenant de son étude de 2005 [39][112] et évalué sur le site du Laboratoire souterrain, appelé « SDD » ci-après. L'IRSN ne revient pas sur cette étude présentée dans le cadre de l'examen du « Dossier 2005 » [13] dans le présent rapport. Dans le cadre de la présente instruction, l'Andra [108][109] a présenté de nouveaux calculs déterministes et probabilistes de l'aléa sismique pour le site de **Cigéo** qu'elle retient en prévision de la **DAC**. L'Andra précise se référer à l'approche déterministe de la **RFS 2001-01** [99] pour déterminer l'aléa sismique pour les bâtiments nucléaires de surface ; l'approche probabiliste est mise en œuvre pour évaluer les périodes de retour associées aux spectres déterministes. **L'IRSN considère que cette démarche est en accord avec les préconisations formulées lors des instructions précédentes.**

Concernant la nouvelle analyse déterministe réalisée en prévision de la **DAC**, l'Andra [108] présente des calculs de spectres **SMHV** et **SMS** pour quatre localisations (descenderies, puits, zone **MAVL** et Laboratoire souterrain). L'Andra retient trois spectres de réponse correspondants à trois séismes historiques de référence (Bligny, Bitche et Remiremont) et montre que ces trois spectres sont « couverts » (*i.e.*, présentent de plus faibles accélérations) par le spectre **SMF**. Pour établir les magnitudes et profondeurs de ces séismes historiques, l'Andra se fonde sur une méthodologie nouvelle développée dans le cadre d'un programme de recherche. Cette méthodologie n'est pas

⁷⁴ Par opposition aux approches probabilistes : dans la démarche déterministe, les mouvements de référence sont associés à des séismes de référence.

⁷⁵ $0,1$ fois l'accélération gravitationnelle ($9,81 \text{ m.s}^{-2}$)

encore suffisamment documentée (travail en cours de publication) au stade du **DOS** et fera donc l'objet d'un examen détaillé lors de l'instruction de la **DAC**.

L'Andra [108] conduit ensuite une analyse des incertitudes relatives à la détermination des **SMHV** et des **SMS**, en testant un deuxième zonage, la variabilité des profondeurs ainsi que différentes lois de prédiction du mouvement sismique. L'analyse conduit à définir une distribution statistique de spectres reflétant ces incertitudes. À l'issue de cette étude, l'Andra conclut que le **SMF** couvre le spectre **SMS** médian [108]. L'IRSN estime que la démarche de prise en compte des incertitudes dans l'étude déterministe constitue une bonne pratique, mais considère toutefois qu'en plus du besoin précité de consolider les éléments de justification conduisant aux catalogues de sismicité retenus (i.e., magnitudes et profondeurs des séismes historiques), l'analyse des incertitudes devrait être complétée par d'autres hypothèses que celles précitées (notamment d'autres zonages) pour la **DAC**. En tout état de cause, l'IRSN constate qu'au-dessus de 5 Hz, près de la moitié des scénarios **SMS** explorés par l'Andra conduit à des niveaux sismiques supérieurs à ceux du **SMF** (voir Figure 76). Aussi, l'IRSN estime qu'une démarche prudente doit considérer la variabilité de l'aléa sismique mise en évidence par cette étude pour évaluer le comportement sismique des installations.

L'ensemble de ces remarques de l'IRSN sur l'aléa sismique retenu par l'Andra pour les installations de surface en phase d'exploitation est repris dans l'engagement E55-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017 présenté ci-dessous.

La nouvelle analyse probabiliste réalisée par l'Andra en prévision de la **DAC** [108] attribue au **SMF** une période de retour comprise entre 30 000 et 80 000 ans. L'IRSN estime que l'éclairage apporté par l'analyse probabiliste est un élément d'appréciation supplémentaire utile. Toutefois, l'IRSN considère que les valeurs de période de retour obtenues restent à vérifier compte tenu de ses réserves sur les paramètres du calcul probabiliste de l'aléa sismique (poids des hypothèses retenues, magnitudes maximales, magnitudes minimales, catalogues, vitesses des failles, sigma, etc.) qui sont détaillées au chapitre 8.1.2.2 du présent rapport. L'IRSN souligne en outre que l'Andra n'a pas apporté d'appréciation, en termes de probabilités de dépassement du **SMF**, sur les périodes de retour évaluées au regard de la durée de vie des installations de **Cigéo** (jusqu'à 150 ans), significativement supérieure à ce qui est usuellement considéré pour les **INB** (environ 50 ans pour les réacteurs, laboratoires et usines).

La conversion d'un **SMS** en spectre sismique est réalisée au moyen d'une équation fournie par la **RFS** 2001-01 [99], qui prend en compte des paramètres liés à la vitesse des ondes de cisaillement dans les 30 premiers mètres de profondeur « Vs 30 ». En effet, lorsque cette vitesse est faible (couche de sol de faible résistance mécanique), le mouvement sismique peut se trouver amplifié (« effets de site »). L'Andra a fait l'inventaire des conditions de sols et conclut que les vitesses Vs 30 sont supérieures à 800 m/s (catégorie des vitesses les plus rapides au sens de la **RFS** 2001-01). **L'IRSN n'a pas de commentaire sur ce point.**

Pour ce qui concerne l'aléa sismique pour l'installation souterraine et les liaisons surface-fond de **Cigéo**, l'Andra mène actuellement des investigations visant à caractériser les variations du mouvement sismique en fonction de la profondeur (modélisation, impact des caractéristiques des séismes, e.g. magnitude, distance) sur la base des données enregistrées en surface et à trois profondeurs du Laboratoire souterrain (-254 m, -445 m et -490 m). Au cours de l'instruction, l'Andra a présenté la variation du pic d'accélération du mouvement sismique (Peak Ground Acceleration, PGA) en fonction de la profondeur sur la base de l'enregistrement de 133 séismes. Les résultats obtenus montrent, généralement, une décroissance par rapport à la surface du PGA mesuré dans les couches calcaires situées au-dessus du Callovo-Oxfordien puis une augmentation du PGA dans les deux niveaux mesurés au

sein du Callovo-Oxfordien. Dans certains cas, les enregistrements en profondeur dépassent le niveau sismique enregistré en surface. L'Andra conclut à ce stade à l'absence de données suffisantes en l'état actuel des connaissances pour montrer une éventuelle atténuation globale du mouvement sismique entre surface et fond. Sur ce constat, l'Andra indique que les mêmes mouvements sismiques qu'en surface sont considérés « *de manière conservative* » pour le dimensionnement des soutènements/équipements nécessaires au fonctionnement en exploitation de l'installation souterraine et des liaisons surface-fond.

L'IRSN considère que l'étude de la variation du mouvement sismique en fonction de la profondeur par la surveillance instrumentale est une approche adaptée à la problématique. Toutefois les résultats préliminaires présentés par l'Andra au cours de cette instruction sont exprimés uniquement en termes de PGA et n'apportent pas d'information sur l'ensemble de la gamme de fréquences utiles au dimensionnement. A ce stade des études, le caractère conservatif des mouvements sismiques retenu pour le dimensionnement des installations souterraines n'est donc pas démontré.

Aussi, l'IRSN estime que l'Andra devra justifier, dans le dossier de DAC, l'aléa sismique retenu pour la phase d'exploitation au regard de la durée de vie des installations de Cigéo ainsi que :

- pour les installations de surface, au regard de l'analyse des incertitudes associées à la définition du SMS, en considérant notamment des catalogues de sismicité consolidés et d'autres zonages sismotectoniques disponibles ;
- pour l'installation souterraine, au regard d'une étude de la variation du mouvement sismique avec la profondeur dans le domaine de fréquence (0,25 - 33 Hz).

Ce point fait l'objet de l'engagement E55-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

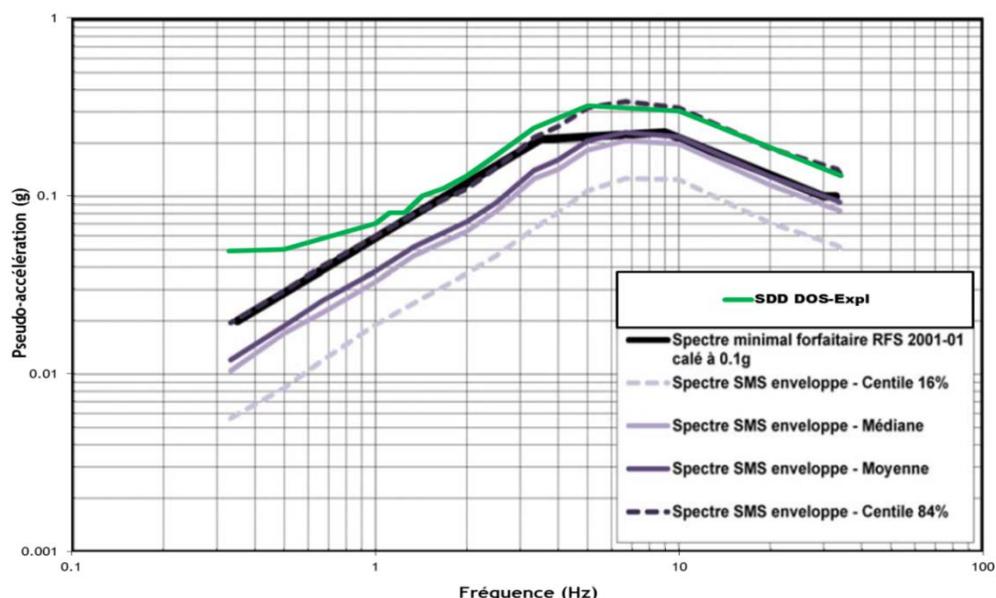


Figure 76 : Comparaison des spectres SMS proposés par l'Andra. En vert (SDD) : spectre de dimensionnement issu de l'évaluation probabiliste de 2005, retenu au stade du DOS. En noir : SMF. En violet : analyse de sensibilité aux incertitudes sur le SMS évalué par méthode déterministe en vue de la DAC. Le spectre SMS « médian » couvre par définition 50 % des valeurs obtenues en prenant en compte les incertitudes.

7.3.1.2 Dimensionnement sismique de Cigéo

A ce stade du projet, l'Andra retient un spectre de dimensionnement pour les installations de surface durant la phase d'exploitation correspondant à un spectre probabiliste médian de période de retour 10 000 ans (« SDD » en Figure 76) provenant de son étude de 2005 [112][39] et évalué sur le site du Laboratoire souterrain. L'Andra considère que le spectre probabiliste de 2005 peut être retenu comme spectre de dimensionnement pour la phase d'exploitation étant donné qu'il est, pour toutes les fréquences, situé au-dessus du SMF. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé « *qu'en cas de difficultés majeures en termes de conception, [elle] pourrait être amenée à revenir sur un dimensionnement au spectre minimal de la RFS 2001-01* ». Compte tenu des réserves de l'IRSN quant au caractère enveloppe du SMF pour représenter l'aléa sismique du site en surface comme en profondeur (cf. conclusion du chapitre 7.3.1.1 précédent), l'IRSN considère que l'option d'un dimensionnement au SMF ne garantit pas que celui-ci soit enveloppe de l'aléa sismique du site et ne procure pas de marge pour prendre en compte les éventuelles évolutions de la connaissance de l'aléa sismique du site. *A contrario*, l'IRSN constate que le spectre de dimensionnement retenu par l'Andra au stade du DOS (SDD) est enveloppe du spectre SMS-centile 84 % issu de l'étude de sensibilité présentée au chapitre 7.3.1.1 : il permettrait de prendre en compte des spectres SMS potentiellement supérieurs au SMF pour évaluer le comportement sismique des installations. **Aussi, il conviendra que, dans le dossier de DAC, l'Andra présente un spectre de dimensionnement des installations pour la phase d'exploitation suffisamment enveloppe par rapport aux spectres d'aléa sismique du site afin notamment de prendre en compte d'éventuelles évolutions de la connaissance de l'aléa sismique du site et la durée d'exploitation des installations.**

Au stade du DOS, l'Andra indique les principales dispositions retenues vis-à-vis des fonctions de sûreté (vis-à-vis des risques de dispersion, d'exposition externe, liés au dégagement de gaz de radiolyse), des risques de pertes de fonctions support (alimentation électrique, surveillance, contrôle commande...), des fonctions de protection contre les agressions (incendie, inondation, manutention et coactivité). L'Andra ajoute des dispositions constructives en termes de génie civil et de stabilité des piles de colis de stockage. **Ces dispositions n'appellent pas de commentaire de la part de l'IRSN.**

Pour ce qui concerne la vérification du comportement de l'installation souterraine sous aléa sismique, l'IRSN rappelle l'engagement 2010 E13.2 [1] de l'Andra, pris à l'issue de l'examen du « Dossier 2009 », de vérifier que ce comportement « *demeure acceptable au regard des exigences associées aux différents ouvrages et équipements. Cette évaluation devra être établie notamment sur la base de combinaisons d'actions correspondant aux différentes situations de fonctionnement de l'installation* ». En particulier, l'IRSN estime qu'il conviendrait, dans le cadre de cet engagement, que l'Andra vérifie la tenue des ouvrages et des équipements, en particulier de ceux classés EIP sous l'effet dynamique d'un séisme de niveau SMS.

Enfin, l'Andra [39] indique que les ouvrages souterrains et des liaisons surface-fond participant à la sûreté de Cigéo après fermeture seront dimensionnés au séisme maximal physiquement possible (SMPP) ; ceci est examiné au chapitre 8.1.2 relatif aux séismes après fermeture.

7.3.2 INONDATION EXTERNE

7.3.2.1 Installations de surface

L'Andra [39] présente une analyse du risque d'inondation dans les installations de surface fondée sur le recensement des « situations de référence à prendre en compte pour le risque d'inondation » (« SRI ») réalisée conformément au Guide n° 13 de l'ASN [185], **ce qui est satisfaisant.**

Compte tenu de l'écart altimétrique entre les cours d'eau du secteur et les cotes projetées pour les plateformes des zones puits et descenderie⁷⁶, l'Andra considère le risque d'inondation de Cigéo par les crues de cours d'eau écarté, de même que le risque d'intumescence⁷⁷ au niveau des bassins de régulation ou de dégradation des capacités de stockage d'eau, ces derniers étant implantés en contrebas des installations. **Ces points n'appellent pas de remarque de la part de l'IRSN.** Les SRI relatives aux pluies de forte intensité et à la remontée de nappe karstique sont examinées ci-dessous.

Pluies de forte intensité et ruissellement associé

L'Andra [39] présente les données pluviométriques obtenues sur cinq stations de Météo-France implantées autour du site : Cirfontaines (5 km au Sud-Est de la zone descenderie), Gondrecourt-le-Château (9,5 km à l'Est de la zone puits), Saint-Dizier (37 km à l'Ouest-Nord-Ouest de la zone descenderie), Erneville-aux-Bois (25 km au Nord de la zone puits) et Epinal (86 km au Sud-Sud-Est). En cours d'instruction, l'Andra a précisé le niveau d'aléa retenu pour le dimensionnement du réseau pluvial et des bassins de régulation associés, à savoir des pluies centennales de durées 10 et 15 minutes de la station de Saint-Dizier décrites par des coefficients de Montana⁷⁸. D'un point de vue strictement méthodologique, les pluies centennales définies avec les coefficients de Montana calculés par Météo-France sont des valeurs médianes alors que le Guide n° 13 de l'ASN [185] préconise l'usage de la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95 %. **Ce point devra donc être corrigé.**

L'Andra [39] retient également le principe d'une gestion des eaux gravitaire du ruissellement sur des plateformes étagées à des niveaux adaptés à la topographie naturelle des deux zones d'implantation. Par ce choix de conception, l'Andra estime limiter significativement l'impact d'éventuels débordements du réseau pluvial sur les installations par les pentes des plateformes et en concentrant le risque sur les plateformes inférieures où sont implantés les bassins. De plus, en cas de pluies dont l'intensité dépasse l'aléa retenu pour le dimensionnement des installations de surface, l'Andra prévoit une gestion des flux supplémentaires par surverse depuis les bassins de régulation vers le milieu naturel. Ainsi, l'Andra exclut tout impact sur les installations de surface de Cigéo. Enfin, les émergences des puits seront implantées à plus de 13 m au-dessus des bassins.

Pour ce qui concerne le choix d'une station pluviométrique représentative du site, la station de Cirfontaines-en-Ornois est retenue dans le DOS [39] mais l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que les pluies centennales prises en compte sont issues de la station de Saint-Dizier. Or, des études à l'échelle des bassins versant de la Saulx et de l'Ornain ont identifié une forte variabilité de la pluviométrie sur le cours amont de ces rivières [175] et notamment

⁷⁶ Pour la zone descenderie, le cours de l'Orge est à environ 325 m NGF pour une face supérieure de radier à 358 m NGF (EP1). Pour la zone puits, le cours de l'Ormançon est à environ 330 m NGF alors que les émergences des puits sont à 365 m NGF.

⁷⁷ Perturbation, dans une masse d'eau peu profonde, de l'écoulement par une onde de surface

⁷⁸ L'intensité pluviométrique centennale (en mm/h) sur une durée ΔT (en minutes) est calculée par la formule $P_{100}(\Delta T) = a \cdot \Delta T^{-b}$ où a et b sont les coefficients de Montana. Ils résultent d'ajustements statistiques et décrivent des valeurs médianes d'intensités pluviométriques exceptionnelles.

dans le secteur d'implantation de Cigéo (relief de côte et vallées encaissées). L'IRSN a étendu la comparaison des cumuls annuels présentés par l'Andra [39] en s'intéressant, d'une part aux pluies journalières et horaires, d'autre part en incluant les données mesurées localement sur la station EST6000 du site du Laboratoire souterrain (en limite Est de la zone descenderie) et les données acquises sur la station météorologique d'Houdelaincourt, disponibles auprès de Météo-France. Cet examen fait apparaître des écarts significatifs de pluviométrie entre stations, dans un rayon de quelques kilomètres autour du site d'implantation de Cigéo. En effet, sur la période 2012-2016, les relevés réalisés au voisinage de la zone descenderie (Station EST6000) présentent les cumuls pluviométriques annuels les plus importants du secteur (+20 à 40 % par rapport à Saint-Dizier, +10 à 30 % par rapport à Houdelaincourt ou Cirfontaines-en-Ornois), écarts que l'on retrouve au pas journalier ou horaire entre St-Dizier et Houdelaincourt ; en outre, les événements pluviométriques de forte intensité n'ont pas la même répartition saisonnière au pas journalier ou au pas horaire selon la station envisagée⁷⁹. Ce point est confirmé par le relevé, sur la période 1980-2015 et dans un rayon de 10 km autour de Cigéo, d'une dizaine de cumuls pluviométriques dépassant les valeurs centennales sur 24 h et 48 h de la station de Saint-Dizier. **Aussi, l'IRSN estime que la station pluviométrique de Saint-Dizier n'est pas représentative de la forte variabilité locale de la pluviométrie autour du site de Cigéo, du site et qu'il conviendrait de vérifier la représentativité de la station de Cirfontaines-en-Ornois au regard des observations locales, notamment de la station proche de la zone descenderie (EST 6000).**

En outre, l'IRSN relève que la station Météo-France de Saint-Dizier, disposant de premiers relevés initiés en 1954, est celle qui présente *a priori* la durée de suivi la plus longue au pas journalier, mais pour les pluies de durées infra-journalières⁸⁰, la station de Cirfontaines-en-Ornois dispose d'un suivi initié 10 ans avant celui de la station de Saint-Dizier. La station de Cirfontaines-en-Ornois dispose donc de davantage de données exploitables pour réaliser les analyses fréquentielles nécessaires à la définition des aléas météorologiques. **Aussi, l'IRSN estime que le choix de la station de Cirfontaines-en-Ornois semble plus pertinent que celui de la station de Saint-Dizier pour la détermination des pluies centennales infra-journalières.**

Pour ce qui concerne le dimensionnement du réseau pluvial et des bassins, l'état d'avancement du projet ne permet pas d'évaluer le risque d'entrée d'eau pluviale dans les bâtiments. Au stade du DOS, l'étagement des plateformes et la gestion gravitaire des écoulements et surverses constituent des principes satisfaisants. L'IRSN relève cependant que l'usage de pluies de durées (10 et 15 minutes) apparaissant *a priori* courtes pour définir la capacité de bassins d'orage. Usuellement, les pluies de courtes durée (6 min à 1 h) sont en effet utilisées pour dimensionner les réseaux d'évacuation alors que la capacité des bassins d'orage est évaluée avec une durée supérieure (au moins une journée) de façon à cumuler un volume suffisant et à n'utiliser qu'exceptionnellement des dispositions telles que les surverses directes dans les cours d'eau avoisinants. **Aussi, l'IRSN considère qu'une démonstration conforme au guide n° 13 de l'ASN de l'absence effective de risque d'inondation pluviale reste à établir, notamment au moyen de la quantification du débit de ruissellement et du comportement du réseau pluvial.**

⁷⁹ Sur la période 2012-2016, les pluies horaires les plus fortes relevées sur la station d'Houdelaincourt (qui présente des cumuls mensuels similaires à ceux de la station de Cirfontaine-en-Ornois) ne sont pas relevées par la station de St-Dizier, et plus généralement lorsqu'il s'agit d'événement intervenus en mai et juin.

⁸⁰ La publitheque Météo-France indique la disponibilité de chroniques pluviométriques au pas horaire à partir de 2004 pour la station de St-Dizier et de 1994 pour Cirfontaines-en-Ornois. Au pas de 6 minutes, ces deux stations présentent chacune un suivi initié en 2007. (<https://publitheque.meteo.fr/>).

Aussi, dans le dossier de DAC, conformément à l'application du Guide n° 13 de l'ASN, l'Andra devra :

- vérifier la pertinence de la station de référence qu'elle retiendra pour les pluies de forte intensité selon une approche régionalisée s'appuyant sur des données issues de stations locales pour lesquelles des données de précipitation pertinentes sont disponibles (incluant EST 6000) et ajuster le résultat si besoin ;
- justifier les modalités de transposition des analyses statistiques conduites sur les données locales avec les données de la station de référence ;
- présenter les valeurs de pluies centennales retenues pour les différentes durées prises en compte, correspondant à la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95 % et vérifier la robustesse vis-à-vis des autres stations présentes localement ;
- présenter les hypothèses, données d'entrée et résultats des calculs permettant de s'assurer du bon dimensionnement des différents composants du réseau pluvial et analyser un scénario de ruissellement de surface en considérant indisponibles les accès au réseau local d'évacuation des eaux pluviales.

Ce point fait l'objet de l'engagement E56-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

Remontée de nappe karstique

L'Andra [39] présente un niveau de nappe extrême estimé à 363 m NGF dans les calcaires du Barrois au droit du futur bâtiment EP1 (zone descenderie), fondé vers 357 m NGF. En cours d'instruction, l'Andra a indiqué que la solution technique de drainage des eaux souterraines prévue sous le radier et au droit des voiles du bâtiment EP1 avait été révisée pour retenir une double étanchéité avec drainage interstitiel. Sous le radier, le drainage (renvoyé vers l'extérieur) n'assure plus qu'un rôle de surveillance de l'étanchéité. L'Andra a transmis un descriptif de la méthode d'évaluation de remontée de nappe karstique mise en œuvre, selon les étapes suivantes :

- une analyse de la chronique piézométrique disponible au plus près de l'emplacement du futur bâtiment EP1, mesurée au pas horaire sur le piézomètre EST1012 depuis 1996 (voir Figure 56). L'Andra retient une dizaine d'événements indépendants pour lesquels la nappe a dépassé 356,1 m NGF, niveau atteint annuellement en période de hautes eaux. Le niveau maximal, atteint le 30/10/1998, est de 359,12 m NGF, valeur estimée du fait d'un défaut d'enregistrement du pic de remontée ;
- une analyse statistique de la chronique sur ce piézomètre afin d'estimer les niveaux de nappe extrêmes. Il s'agit d'estimer la probabilité de dépassement d'un niveau donné via l'utilisation d'une loi de distribution GEV⁸¹ qui met en relation les niveaux piézométriques très hauts et leurs fréquences de dépassement, exprimées en termes de période de retour. Le niveau centennal estimé (borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95 %) est de 360,18 m NGF ;
- la translation de 150 m du niveau extrême estimée sur le piézomètre EST1012 vers l'amont du bâtiment EP1. Avec un gradient piézométrique local estimé à 2 %, l'Andra rehausse le niveau centennal à 363 m NGF.

Concernant la zone puits, l'Andra a indiqué que sur les bâtiments seraient fondés entre 355 et 375 m NGF, soit plus de 10 m au-dessus du niveau extrême estimé à 343,7 m NGF.

⁸¹ Generalized Extreme Value ou « loi de Fisher-Tippett » : loi de probabilité visant à représenter des phénomènes de valeurs extrêmes (minimum ou maximum).

Ainsi, l'Andra a évalué les interactions potentielles entre nappe et bâtiments et retenu de protéger le bâtiment EP1 contre une remontée de nappe au droit de la zone descendrière. Elle a également exclu tout risque de remontée de nappe au niveau de la zone puits. Toutefois, l'IRSN relève au stade du DOS que ni le suivi piézométrique local dans la zone puits, ni les éléments techniques de mise en œuvre du principe de double étanchéité retenu pour protéger EP1 dans la zone descendrière ne sont présentés. Ces deux points devront être présentés dans le dossier de DAC, en vue de conclure sur la maîtrise du risque lié à une remontée de nappe.

Pour estimer un niveau de nappe extrême au droit du bâtiment EP1, l'Andra a conduit une « étude statistique des niveaux de la nappe phréatique » telle que définie dans le guide n°13 de l'ASN [185], ce qui est satisfaisant dans le principe. Cependant, cette méthodologie comporte deux points clés, le choix d'un piézomètre représentatif et l'analyse statistique, dont il convient de s'assurer de la pertinence.

S'agissant du choix d'un piézomètre représentatif, l'IRSN relève les points suivants :

- aucun piézomètre n'est implanté en amont du bâtiment EP1, ce qui nécessite la translation des résultats de l'analyse sur la base d'un gradient piézométrique extrapolé (+2 m) ;
- le piézomètre EST1039 (voir Figure 56) n'est pas retenu alors qu'il présente des niveaux hauts supérieurs à ceux observés sur le piézomètre EST1012 (de +0,5 m à +3 m), des fluctuations d'amplitude similaires et des remontées plus rapides.

Ainsi, l'IRSN considère que l'état actuel des connaissances piézométriques de la zone descendrière ne permet pas d'établir le caractère pénalisant, au droit du bâtiment EP1, du niveau exceptionnel de 363 m NGF établi par l'Andra.

S'agissant de l'analyse statistique des niveaux de nappe réalisée par l'Andra, l'IRSN relève qu'elle présente des biais méthodologiques susceptibles de remettre en cause la validité des résultats, notamment car l'échantillon de onze valeurs constitué pour l'analyse statistique est d'une taille insuffisante pour conduire un ajustement fiable. En effet, une trentaine de valeurs constitue un minimum acceptable selon les bonnes pratiques [186].

L'IRSN rappelle que pour compléter les méthodes fondées sur une chronique de niveaux mesurés *in situ*, le guide n°13 de l'ASN [185] recommande l'usage d'outils de modélisation, notamment pour prolonger la chronique piézométrique à partir d'autres données climatologiques souvent disponibles sur une période plus longue. L'usage d'un modèle permet également de tester plusieurs piézomètres de référence potentiels et de vérifier que, le plus souvent, les remontées les plus fortes interviennent en hiver, lorsque le milieu karstique est déjà partiellement saturé, avec des cumuls pluviométriques qui présentent rarement un caractère exceptionnel.

Aussi, l'IRSN recommande que l'Andra réévalue, dans le dossier de DAC, le niveau de nappe extrême en intégrant le contexte piézométrique détaillé de la zone descendrière et justifie la méthodologie retenue, notamment en regard du guide inondation ASN et des règles de l'art. Ce point fait l'objet de l'engagement E57-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

7.3.2.2 Installation souterraine

En réponse à son engagement 2010 E14.2 [1], l'Andra a présenté les dispositions qu'elle prévoit vis-à-vis du risque d'inondation externe de l'installation souterraine. L'objectif technique retenu est d'assurer l'étanchéité des liaisons surface-fond au niveau des calcaires du Barrois (cf. Figure 2), de façon à limiter à 50 L/h par ouvrage les flux d'eau d'infiltration à gérer à la base des calcaires du Barrois. De plus, l'Andra estime, sur la base du retour d'expérience

de l'exploitation du Laboratoire souterrain [85], devoir gérer au plus un flux de 20 L/h issu des formations de l'Oxfordien.

Dans la zone descenderie, l'Andra prévoit de réaliser des fosses étanches en tête des descenderies, recoupant intégralement les calcaires du Barrois, avant de commencer le creusement au tunnelier à partir des marnes du Kimméridgien. Elle prévoit en outre de réaliser un ouvrage en base de descenderie, destiné à la gestion des eaux d'exhaure. Elle a indiqué que les deux rétentions des eaux de drainage du Kimméridgien et de l'Oxfordien, envisagées dans une recoupe située dans le Callovo-Oxfordien entre les deux descenderies, feraient l'objet d'un dimensionnement présenté dans le dossier de DAC. Dans la zone puits, l'Andra prévoit de creuser de 5 à 8 puits (dont trois en option) de 6 à 8 m de diamètre (cf. chapitre 2.2.2.2) à l'explosif. A l'exception du puits de retour d'air vicié de la zone « exploitation » conçu entièrement étanche sur toute sa hauteur (pour limiter sa maintenance), les autres puits sont :

- conçus étanches dans le Barrois ;
- drainés et disposant d'un revêtement d'étanchéité au niveau du Kimméridgien et de l'Oxfordien ;
- munis de dispositifs de collecte des éventuelles venues d'eau en fond de puits.

L'Andra a précisé au cours de l'instruction que les résultats des campagnes des reconnaissances préalables au creusement, réalisées (zone descenderie) ou planifiées (zone puits), détaillées au chapitre 4.4 relatif à la caractérisation géotechnique de surface, seront versés à l'APD. L'IRSN estime effectivement que ces résultats nécessiteraient d'être présentés dans le dossier accompagnant la DAC. Au vu des résultats des campagnes de reconnaissance, qui comportent notamment l'observation de micro-karsts dans les carottages réalisés en zone descenderie, l'Andra estime que les calcaires du Barrois sont très fracturés sur les premiers mètres, fracturés en-dessous sur quelques mètres et sains au-dessus des marnes du Kimméridgien [73]. En outre, l'Andra a présenté au cours de l'instruction une étude des possibilités d'interception d'un réseau de conduits karstiques par les ouvrages de liaison surface-fond [107], réalisée en simulant un réseau karstique par méthode stochastique sur la base d'une très faible densité karstique observée sur le terrain. L'Andra conclut que les liaisons surface-fond ne recouperaient aucun des conduits karstiques simulés, dont le diamètre est estimé à 0,2 m.

L'IRSN considère que les calcaires du Barrois constituent la seule source susceptible de mobiliser les volumes d'eau et les débits les plus importants du fait de niveaux plus fortement fracturés et de circulations karstiques. Aussi, compte tenu de la nécessité d'assurer l'étanchéité des liaisons surface-fond au niveau du Barrois sur des durées au-delà de la centaine d'années, les principaux éléments de prévention d'une inondation des installations souterraines sont constitués par (i) la reconnaissance effective des éventuels conduits karstiques présents à proximité ou interceptés lors des travaux et par (ii) l'étanchéification des calcaires du Barrois sur une épaisseur suffisante autour des liaisons surface-fond et au moyen de matériaux durables et performants. À ce stade du projet, l'Andra n'a pas défini les niveaux d'étanchéité à atteindre, les types de traitement pouvant répondre à ces objectifs ainsi que l'ensemble des dispositions de surveillance permettant de s'assurer de la durabilité de ces dispositions. L'IRSN estime en outre l'étude par l'Andra des possibilités d'interception de conduits karstiques peu étayée car d'une part elle s'appuie sur une très faible densité karstique insuffisamment vérifiée sur le terrain, et d'autre part elle conclut à l'absence d'interception des conduits karstiques simulés par les liaisons surface-fond alors que la conclusion aurait dû rigoureusement être formulée en termes de probabilités d'interception. **Aussi, l'IRSN estime que la possibilité que les puits interceptent des conduits karstiques n'est pas écartée à ce stade.**

L'IRSN observe qu'au droit des têtes de descenderie, la nappe des calcaires sublithographiques est d'épaisseur réduite (moins de dix mètres) avec une zone d'apport d'extension limitée par la vallée de l'Orge. Ainsi, le creusement des calcaires sur une quinzaine de mètres peut être conduit avec une étanchéification réalisée avant ou après creusement. De plus, l'IRSN note que le comportement hydrogéologique local sera mieux connu à l'échéance de la DAC puisque l'Andra s'est engagée à présenter le contexte piézométrique détaillé de la zone descenderie autour de l'installation EP1 (afin de déterminer le niveau de nappe extrême : cf. chapitre 7.3.2.1 précédent). **Aussi, pour les têtes de descenderie, l'IRSN estime qu'il conviendrait que l'Andra mette en œuvre une méthode de creusement des calcaires du Barrois permettant de réaliser un relevé lithologique des parois, de détecter la présence d'éventuelles cavités karstiques, de purger et d'étanchéifier les zones favorables aux écoulements (forte fracturation, karsts).**

Au droit des puits, l'enjeu paraît plus important dans la mesure où ces ouvrages recouperont, sur une hauteur pouvant dépasser 60 m, la nappe superficielle des calcaires de Dommartin puis la nappe captive des calcaires sublithographiques (cf. chapitre 4.6.1.1). Ce contexte diffère significativement du contexte rencontré lors du creusement des puits du Laboratoire souterrain (qui ne traversent que la nappe des calcaires sublithographiques) dans la mesure où l'interception d'une zone très fracturée ou d'un conduit karstique peut mobiliser un volume d'eau important avec une charge hydraulique de plusieurs dizaines de mètres. **Aussi, l'IRSN estime nécessaire la mise en œuvre d'une reconnaissance géophysique adaptée à la reconnaissance des structures drainantes à l'avancement du creusement de chacun des puits, en plus de la reconnaissance préalable (cf. chapitre 4.4). En outre, après le passage des calcaires du Barrois, il conviendra de réaliser une étanchéité qui ne puisse être endommagée par la poursuite du creusement des puits (notamment s'ils sont effectués à l'explosif), et qui reste assurée sur toute la durée de la phase d'exploitation. Aussi, l'IRSN estime que la fonction d'étanchéité pourrait soit être vérifiée *a posteriori* (après le creusement), soit être portée par deux composants indépendants au titre de la défense en profondeur, par exemple le revêtement étanche complété par des injections sur toute la hauteur des calcaires du Barrois.**

Pour ce qui concerne les conséquences éventuelles d'une inondation d'origine externe autre qu'un défaut d'étanchéité majeur d'un puits au passage d'une zone très fracturée ou d'un conduit karstique, l'IRSN considère qu'une inondation pourrait conduire à des désordres associés à un gonflement des argilites, à l'image de ceux constatés sur le radier de la niche (amorce de galerie à -445 m) du Laboratoire souterrain [85]. Cependant, l'Andra a indiqué en cours d'instruction que les déversements d'eau intervenus dans le Laboratoire lui-même⁸², consignés sur un registre, n'ont pas généré de désordre sur les radiers. L'IRSN estime donc que compte tenu de son retour d'expérience, l'Andra dispose d'éléments probants à l'égard de sa capacité à aménager les puits et les descenderies, puis collecter et gérer des volumes d'eau infiltrés au travers des revêtements drainants de l'Oxfordien afin de maîtriser le risque d'inondation d'origine externe. Toutefois, l'IRSN n'est pas en mesure de confirmer que les dispositions prévues sont suffisantes (rétentions, pentes des galeries,...) vis-à-vis des volumes d'eau collectées en situation normale ou incidentelle (rupture de canalisation, indisponibilité des moyens de relevage...). **Aussi, l'IRSN estime que l'Andra devra, en appui du dossier de DAC, à l'image de la démarche du guide ASN n° 13 applicable aux installations de surface [185], recenser par sources d'eau les situations à risque d'inondation d'origine**

⁸² Entre 2006 et 2013, 8 événements ont été recensés (de 200 L à moins de 30 m³), principalement liés à des problèmes sur les canalisations. D'autres déversements et fuites de faible ampleur ont été observés, notamment au niveau de la galerie de fabrication du béton projeté lors de nettoyages (une dizaine de cas par an, de l'ordre de 50 à 100 litres) [85].

externe pour les installations souterraines ainsi qu'indiquer les volumes mobilisables et le mode de gestion prévu.

L'IRSN estime que l'Andra devra prévoir une reconnaissance des zones d'écoulement au sein des calcaires du Barrois, préalable au creusement de chaque puits ou à l'avancement, dans le but d'identifier les éventuels zones d'écoulement reconnues ou possibles, en regard du caractère karstique des calcaires du Barrois, et définir les besoins de traitement de terrain à réaliser en préalable ou durant la construction pour se prémunir des venues d'eau. La conception de ces traitements tiendra compte des méthodes de creusement et de réalisation des puits. Le revêtement étanche des puits sur toute la hauteur des calcaires du Barrois sera dimensionné vis-à-vis de sa tenue et de sa robustesse pendant la période d'exploitation de Cigéo, en prenant en compte les divers éléments susceptibles de l'altérer dans le temps, y compris les situations extrêmes.

Ce point fait l'objet de l'engagement E58-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

Afin de statuer définitivement sur la possibilité d'exclure le risque d'inondation externe lié à l'étanchéité des puits au passage de zones très fracturées ou de conduits karstiques, l'IRSN rappelle qu'il est nécessaire que l'Andra transmette, dans le dossier accompagnant la DAC :

- les résultats des campagnes de reconnaissance préalables réalisées dans les zones puits et descenderies ;
- le programme de reconnaissance à l'avancement du creusement qui en résulte ;
- les traitements envisagés pour se prémunir des venues d'eau au cours du creusement ainsi qu'après ;
- la conception retenue pour le revêtement étanche des puits.

7.3.3 ALEAS METEOROLOGIQUES (INSTALLATIONS DE SURFACE)

L'Andra [39] présente une synthèse des observations sur plusieurs stations météorologiques autour du site d'implantation de Cigéo pour la neige, le vent et les températures, ainsi que les aléas climatologiques retenus pour le dimensionnement des installations de surface de Cigéo.

D'une manière générale, l'IRSN observe que les niveaux d'aléas choisis ne sont pas justifiés par l'Andra, en particulier par rapport aux données météorologiques présentées. Au cours de l'instruction, l'Andra a modifié la définition de certains de ces aléas en vue de la préparation du dossier de DAC. Des aléas relatifs aux chutes de neige, aux températures extrêmes (grand chaud et grand froid), aux vents extrêmes et à la tornade, l'IRSN retient les éléments suivants.

Aléa neige

L'Andra [39] indique que les précipitations neigeuses représentent de 8 à 10 % de la pluviométrie annuelle, sur 25 à 30 jours par an en moyenne entre novembre et avril. L'aléa neige, exprimé sous forme de valeur caractéristique de la charge de neige au sol, est présenté en définissant une valeur normale (0,35 kN/m²) et une valeur extrême (0,6 kN/m²), dénominations classiquement attachées à l'usage des règles Neige et Vent (NV65, maintenant

remplacée par l'Eurocode 1.3). En cours d'instruction, l'Andra a précisé que cette charge extrême, qui correspond à une hauteur de neige d'environ 45 cm⁸³, est conforme au niveau requis par l'Eurocode 1.3.

L'IRSN observe cependant que la période de retour de l'aléa pris en compte dans l'Eurocode précité est de l'ordre de 50 ans, soit une période plus courte que celle prévue pour l'exploitation de certaines installations de surface de Cigéo. De plus, l'IRSN souligne que des phénomènes exceptionnels de neige, de type « horsain⁸⁴ », sont difficilement prévisibles et sont difficiles à prendre en compte dans l'estimation des hauteurs de neige. Des événements de ce type ont été écartés dans les études statistiques en support de l'Eurocode 1.3 et considérés *via* une charge en situation accidentelle, uniquement dans la région où elles ont été observées. Comme tout phénomène de type « horsain », l'IRSN estime que leur prise en compte est également nécessaire dans les zones n'ayant pas observé à ce jour d'événements exceptionnels de neige, si leur survenue ne peut pas être écartée.

Enfin, l'IRSN rappelle que les effets associés aux chutes de neige ne se limitent pas aux charges sur les structures mais peuvent affecter par exemple, les réseaux électriques, routiers ou la ventilation. L'Andra a précisé au cours de la réunion préparatoire que ces effets potentiels de la neige seront présentés à l'échéance de la DAC.

Aussi, l'IRSN considère que le caractère extrême du chargement de neige issu de l'application de l'Eurocode 1.3 n'est pas établi pour le dimensionnement de Cigéo au stade du DOS. Ce point fait l'objet de l'engagement E60-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, présenté en fin du présent chapitre 7.3.3.

Aléas températures extrêmes

L'Andra [39] présente les fluctuations mensuelles des températures minimales et maximales sur différentes stations ainsi que les valeurs extrêmes mesurées (cf. Tableau 21). Pour les contraintes applicables aux équipements et autres matériels, l'Andra retient une plage de fluctuation thermique entre -15°C/+35°C.

Contenu du DOS-Expl [39]		Compléments transmis
Données	Niveau d'aléa retenu	
Station de réf : St-Dizier Max : 40,4°C en 2003 Min : -22,5°C en 1956	-15°C/+35°C en plage normale <u>Extrêmes</u> : -20°C/+40°C sur 24 h -25°C/+45°C sur 6 h	<u>Aléas prévus pour la DAC</u> : Pour les équipements : -20°C/+42°C sur 7 j -25°C/+47°C sur 12 h Pour le génie civil (semi enterré) : -20°C/+40°C (Eurocode 1.5)

Tableau 21 : Températures extrêmes présentées par l'Andra.

Pour les aléas grand chaud et grand froid, l'Andra présente des températures extrêmes sur différentes durées (cf. Tableau 21), selon une méthode également mise en œuvre par EDF pour intégrer l'évolution climatique. En cours d'instruction, l'Andra a différencié ces niveaux des niveaux d'aléa thermique applicables au génie civil en retenant les valeurs préconisées par l'Eurocode 1.5, en indiquant que le génie civil est semi-enterré. De plus, elle a également révisé l'aléa grand chaud à la hausse dans la perspective du dossier de DAC, de façon à intégrer les

⁸³ L'Eurocode 1.3 retient une neige de masse volumique moyenne de 150 kg/m³. Cette valeur peut varier de 90-100 à 400 kg/m³.

⁸⁴ Événement extrême tel qu'un niveau de précipitations (pluie, neige...) beaucoup plus élevé que les autres valeurs.

résultats des projets IMFREX⁸⁵ et PRUDENCE⁸⁶. L'Andra indique ainsi disposer de valeurs centennales, estimées enveloppes à l'échelle de la France.

L'IRSN observe que les données issues du projet IMFREX couvrent une échelle de temps inférieure à celle correspondant à la durée d'exploitation de Cigéo. En outre, depuis la fin de ce projet, les modèles et les scénarios de forçage climatique exploités ont significativement évolué. L'IRSN rappelle que les aléas liés aux températures extrêmes sont associés à des simulations permettant de valider l'acceptabilité des températures résultantes sur le comportement du génie civil ou, à l'intérieur du bâtiment, sur le fonctionnement d'équipements de sûreté. En l'absence de définition précise des cibles liées aux fonctions à maintenir en cas de grand chaud ou de grand froid (équipements de ventilation, alimentation électrique...), l'IRSN estime que la transposition de la méthodologie d'EDF aux installations de Cigéo n'est pas suffisamment étayée à ce stade. Enfin, l'IRSN relève que l'Andra a exclu de son analyse les températures relevées sur la station EST6000, alors que les températures moyennes et extrêmes se situent au-dessus de celles de la station de Cirfontaines-en-Ornois (en moyenne à +2,2°C sur la période 2002-2010 [184]).

Aussi, l'IRSN estime que la représentativité et le caractère majorant de l'aléa températures extrêmes ne sont pas établis au stade du DOS. Il conviendra, à l'échéance de la DAC, de réévaluer les niveaux de températures extrêmes en tenant compte de l'état de l'art disponible et des effets locaux ainsi que de préciser les durées et niveaux d'aléas visés pour les températures retenues en fonction de la nature des équipements à protéger. Ce point fait l'objet d'une partie de l'engagement E60-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, présenté en fin du présent chapitre 7.3.3.

Aléa vent extrême

L'Andra [39] présente la rose des vents à Saint-Dizier (conditions normales) en indiquant la nécessité de prendre en compte l'orographie⁸⁷ locale pour pouvoir transposer les valeurs observées sur la station de Saint-Dizier au site de Cigéo. Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué qu'elle retiendrait la station d'Houdelaincourt, plus proche du site et suivie depuis mi-2011 pour le dossier de DAC (cf. Tableau 22). Si ce choix apparaît adapté aux conditions de vent normal, l'IRSN estime d'ores et déjà que la durée d'observation locale reste insuffisante pour définir un niveau de vents extrêmes pour le dimensionnement de Cigéo.

Contenu du DOS-Expl [39]		Compléments transmis
Données	Niveau d'aléa retenu	
Station de réf : St-Dizier Max : 160 km/h	Vent extrême majoré par l'aléa tornade (niveau EF2) soit de 50 à 60 m/s	Station de référence pour le dossier de DAC : Houdelaincourt Vitesse de vent de l'aléa tornade (EF3), 234 km/h = 65 m/s.

Tableau 22 : Données retenus par l'Andra pour l'aléa vent extrême.

⁸⁵ Le projet IMFREX, finalisé en 2005, visait à définir des températures de période de retour 100 ans à la fin du 21ème siècle, pour définir des niveaux d'aléas à l'échelle de la durée de vie des réacteurs d'EDF (projet EPR). En effet, l'augmentation globale de la fréquence de dépassement des températures extrêmes chaudes par rapport au seuil depuis les années 1960-1970 sur la plupart des stations météorologiques françaises nécessite soit de tenir compte de la non stationnarité des séries dans leur analyse statistique, soit d'utiliser les résultats des scénarios de changement climatique.

⁸⁶ PRUDENCE : projet 5e PCRD 2001-2004, "Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects".

⁸⁷ L'orographie est la description des reliefs. Elle influence donc la vitesse des vents.

En se fondant sur le retour d'expérience régional d'une rafale de 160 km/h (44 m/s) à Saint-Dizier⁸⁸, l'Andra [39] indique que le dimensionnement aux vents extrêmes sera couvert par le dimensionnement à la tornade de niveau EF2⁸⁹, soit des rafales comprises entre 50 et 60 m/s. Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué retenir une valeur supérieure, 65 m/s, correspondant à la tornade EF3 de référence.

Bien que la valeur de 65 m/s apparaisse pénalisante, l'IRSN rappelle que, comme le recommande l'Eurocode 1.4 pour la détermination de vents extrêmes, l'Andra ne peut faire référence en l'état à la vitesse des vents mesurés à Saint-Dizier mais doit tenir compte des effets locaux (occupation du sol et orographie) qui peuvent avoir une influence significative au niveau du site d'implantation de Cigéo. Aussi, les marges prises par rapport à l'Eurocode 1.4 et aux observations régionales nécessitent d'être quantifiées pour le dossier de DAC, notamment en intégrant les effets orographiques locaux dans l'estimation du niveau de vents extrêmes.

Aléa tornade

L'Andra [39] présente les niveaux d'aléa tornade retenus pour le dimensionnement (cf. Tableau 23) :

- un niveau EF2 pour le hall de chargement/déchargement des colis, du fait de la protection offerte par les emballages de transport, qui résisteraient à la ruine du hall ;
- un niveau EF3 pour les bâtiments nucléaires contenant des EIP et les têtes de puits. Les caractéristiques de cette tornade ont été transmises en cours d'instruction.

Contenu du DOS-Expl [39]	Compléments transmis
Niveau d'aléa retenu	
Selon la cible : - Hall de déchargement : EF2 - Bâtiments nucléaires : EF3	<u>Caractéristiques de la tornade EF3 retenue :</u> - Vitesse de vent max : 234 km/h (65 m/s) - Vitesse de translation : 13 m/s - Chute de pression max : 33 mbar - Gradient de chute de pression : 10 mbar/s <u>Projectiles :</u> billes d'acier et véhicule

Tableau 23 : Données retenus par l'Andra pour l'aléa tornade.

Les caractéristiques de tornade retenues par l'Andra n'appellent pas de commentaire. Cependant, l'IRSN relève que l'Andra ne considère que deux types de projectiles (billes d'acier et automobile).

L'IRSN identifie donc d'ores et déjà à la lumière de son instruction sur les méthodologies CEA, AREVA et EDF pour l'évaluation de l'aléa tornade, qu'il conviendrait que l'Andra justifie l'exclusion de projectiles de type tôle, poutre ou tube d'acier dans le dossier accompagnant la DAC.

⁸⁸ La plus forte rafale de vent mesurée sur plusieurs stations de la région (Epinal, Nancy, Saint-Dizier) a été relevée à Saint-Dizier le 26 décembre 1999 lors du passage de la tempête Lothar qui a traversé le Nord-Est de la France. Elle a atteint 160 km/h (44 m/s).

⁸⁹ Niveau d'intensité des tornades sur l'« échelle de Fujita améliorée ». EF2 : 179 à 218 km/h ; EF3 : 219 à 266 km/h.

Ainsi, sur l'ensemble des aléas météorologiques évalués par l'Andra,

l'IRSN considère que l'Andra devra, dans le dossier de DAC :

- justifier le caractère enveloppe du chargement de neige retenu ;
- préciser les durées et niveaux d'aléas visés pour les températures retenues en fonction de la nature des équipements à protéger et, le cas échéant, réévaluer les niveaux de températures extrêmes en tenant compte de l'état de l'art disponible et des effets locaux ;
- justifier les marges prises sur la vitesse de vent extrême.

Ce point fait l'objet de l'engagement E60-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

7.3.4 RISQUES LIÉS A L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL, AUX VOIES DE COMMUNICATION ET A LA CHUTE D'AERONEF (INSTALLATIONS DE SURFACE)

Vis-à-vis des risques liés à l'environnement industriel et aux voies de communication, l'Andra indique qu'au regard de la très faible industrialisation de la région, les sources de danger présentant des risques pour les installations de surface sont limitées à [39] :

- la plateforme Syndièse dédiée à la production de biocarburant, installation classée pour la protection de l'environnement (ICPE) soumise à déclaration. Cette ICPE est située au Nord-Ouest de Saudron à environ 2 km de la zone descendrière et 4,5 km de la zone puits ; les autres ICPE se situent à plus de 25 km ;
- la route départementale D960, reliant les communes de Saudron et de Mandres-en-Barrois (5 km à l'Ouest de Saudron) et qui traverse actuellement la zone descendrière. Sa déviation est prévue à 650 m au Nord de la zone descendrière ;
- la route départementale D175, à 500 m à l'Ouest de la zone descendrière, reliant les communes de Saudron et de Gillaumé (3 km au Sud de Saudron).

Concernant l'environnement industriel, l'Andra estime que la distance de 2 km est suffisante pour écarter tout impact significatif d'un accident sur Syndièse par rapport aux installations de [Cigéo](#). Pour les ICPE, ceci n'appelle pas de remarque. En revanche, l'IRSN observe que l'Andra n'identifie pas les risques liés aux canalisations de gaz ou d'hydrocarbures enterrées alors qu'il est prévu, au stade du [DOS](#) d'alimenter les chaudières du site en gaz naturel [39]. Il conviendra, dans le dossier de [DAC](#), que l'Andra inclue, si cela est confirmé en [APD](#), les risques induits par les utilités de ces chaudières.

Concernant les voies de communication, l'Andra retient deux scénarios accidentels sur un camion de GPL de capacité 20 tonnes [39] :

- une vaporisation violente du GPL consécutive à la rupture du camion-citerne (BLEVE⁹⁰) ;
- une fuite sur un camion-citerne de GPL (Ø 80 mm) entraînant la formation d'un nuage de gaz inflammable puis son inflammation (UVCE⁹¹).

⁹⁰ BLEVE : boiling liquid expanding vapor explosion.

⁹¹ UVCE : unconfined vapor cloud explosion.

D'après les estimations réalisées par l'Andra, l'UVCE conduit aux effets les plus pénalisants. Elle évalue, à l'aide du logiciel PHAST⁹² qu'une surpression maximale de 20 mbar et qu'un flux thermique de 3 kW/m²⁹³ seraient ressentis respectivement à 450 et 225 m de l'accident. L'Andra conclut ainsi à l'absence d'impact des accidents routiers sur les installations [39]. L'IRSN observe toutefois que l'Andra n'évalue pas un scénario de brèche majeure de la citerne du camion de type « trou d'homme » (Ø 407 mm) alors que celui-ci est classiquement retenu pour ce type d'analyse [127]. Avec les mêmes hypothèses et outils que l'Andra, l'IRSN évalue, pour ce scénario, qu'une surpression maximale de 20 mbar et qu'un flux thermique de 3 kW/m² seraient ressentis respectivement à 864 et 833 m de l'accident, soit des distances inférieures à celle séparant les routes D960 et D175 des premières installations à protéger.

Aussi, l'IRSN considère que l'Andra devra compléter, dans le dossier de DAC, son analyse des risques liés à l'environnement industriel et aux voies de communication, en tenant compte :

- des phénomènes dangereux induits par les réseaux de canalisations de gaz ou d'hydrocarbures desservant l'installation Cigéo, si de tels réseaux sont finalement retenus dans la conception ;
- d'un scénario de brèche majeure sur un camion-citerne de GPL, sur les voies de communication pouvant induire ce risque, entraînant la formation d'un nuage de gaz inflammable puis son inflammation (UVCE).

Ce point fait l'objet de l'engagement E61-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

Vis-à-vis des risques liés à la chute d'aéronef, l'Andra réalise une analyse probabiliste conformément à la RFS I.1.a. Pour les familles définies dans la RFS-I.1.a, les aéronefs de référence sont les suivants :

- le CESSNA 210 et le LEAR JET 23 pour l'aviation générale (demi-envergures respectivement de 0,5 m et 5,5 m) ;
- l'AIRBUS A380 pour l'aviation commerciale (demi-envergure de 25 m) ;
- le RAFALE pour l'aviation militaire (demi-envergure de 5,5 m).

De plus, compte tenu de la présence d'un hélicoptère sur le site, l'Andra réalise également une analyse du risque de chute d'un hélicoptère.

En vue d'assurer le maintien du confinement des substances radioactives, l'Andra retient les cibles suivantes :

- le bâtiment procédé de surface, contenant en particulier les colis de déchets ;
- le puits d'extraction d'air vicié de la zone exploitation, au regard de la disponibilité de la ventilation nucléaire des alvéoles MAVL ;
- les réservoirs d'eau incendie de la zone descenderie et de la zone puits, au regard de la gestion du risque incendie.

L'IRSN n'a pas de commentaire sur les cibles retenues.

Pour chaque cible et chaque famille d'aéronef, l'Andra évalue les probabilités annuelles de chute (cf. Tableau 24).

⁹² PHAST - Process Hazard Analysis Software Tool - est un logiciel, développé par la société DNV, de simulation de dispersion dans l'air. Il est employé pour modéliser des écoulements dans l'air à des fins de sécurité industrielle.

⁹³ Il convient de préciser la valeur de 20 mbar correspond au seuil de destruction significative des vitres et celle de 3 kW/m² à des effets irréversibles sur l'homme.

	Bâtiment procédé de surface	Puits extraction air vicié de la zone exploitation	Réservoir d'eau incendie zone descenderie	Réservoir d'eau incendie zone puits
Aviation générale	$8,5 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$9,0 \cdot 10^{-8}$
Aviation commerciale	$6,0 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-9}$	$3,0 \cdot 10^{-9}$	$3,0 \cdot 10^{-9}$
Aviation militaire	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$9,0 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$
Total des trois familles	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$	$3,0 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$
Hélicoptères ^(a)	$2,0 \cdot 10^{-7}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$

^(a) La probabilité annuelle de chute d'un hélicoptère est calculée forfaitairement par une approche temps de présence.

Tableau 24 : Probabilités annuelles de chute pour chaque cible et chaque famille d'aéronef [39]

Sur la base de ces probabilités, l'Andra prévoit de dimensionner :

- le bâtiment procédé de surface à la chute d'un avion militaire ;
- le puits d'extraction d'air vicié à la chute d'un avion de l'aviation générale ;
- le réservoir d'eau incendie de la zone descenderie à la chute d'un avion de l'aviation générale.

L'IRSN convient que le dimensionnement du bâtiment procédé de surface à la chute d'un avion militaire est effectivement plus pénalisant qu'à l'aviation générale.

Les dispositions retenues pour le bâtiment procédé en surface sont le dimensionnement des voiles et dalles béton extérieurs, la mise en place d'un merlonnage⁹⁴ et d'une couverture, l'interdiction d'entreposage des emballages de transport, des colis primaires et des colis de stockage en périphérie du bâtiment procédé, l'existence d'un espace de confinement au-dessus des secteurs correspondant aux cellules « Contrôle C5 » et « Déchargement emballages » (cf. chapitre 2.6.1.1), la présence de locaux au-dessus des locaux procédés, l'interdiction d'ancrage des EIP sur la dalle supérieure et les voiles extérieurs du bâtiment. Pour le puits d'extraction d'air vicié, les dispositions retenues sont le dimensionnement des voiles et dalles béton ainsi que la mise à disposition de ventilateurs mobiles en surface pour une reconfiguration « d'urgence » de la ventilation d'extraction des alvéoles MAVL et des débits associés. Enfin, les trois réservoirs de la zone descenderie sont éloignés et non alignés afin de garantir l'intégrité d'au moins l'un d'entre eux en cas de chute d'avion. **A ce stade, les dispositions prévues par l'Andra vis-à-vis des risques liés à la chute d'aéronef n'appellent pas de remarque.**

L'Andra indique enfin que même si la probabilité de chute est faible pour l'aviation commerciale (cf. Tableau 24), des dispositions de conception sont prévues sur l'installation par mesure de protection physique vis-à-vis d'agressions faisant intervenir un avion commercial (AIRBUS A380). Enfin, la conception des installations prendra en compte les risques induits par le trafic d'hélicoptères ainsi que par le kérosène afin d'éviter un écoulement de celui-ci via les fissures traversantes créées potentiellement par l'impact, **ce que l'IRSN estime satisfaisant.** L'IRSN souligne que la prise en compte de l'AIRBUS A380 comme avion de référence pour l'aviation commerciale ainsi que des risques induits par le trafic d'hélicoptères et l'écoulement de kérosène constituent des points positifs de la démarche.

⁹⁴ Mise en place d'ouvrages consistant en une levée de terre (« merlons »).

7.4 EFFLUENTS ET DECHETS D'EXPLOITATION

7.4.1 GESTION DES EFFLUENTS ET DECHETS

A ce stade du projet l'Andra présente succinctement [39] les effluents et déchets générés par l'installation [Cigéo](#) ainsi que les principes de leur gestion. En premier lieu, l'Andra rappelle les règles et bonnes pratiques de gestion :

- séparer les différents flux au maximum des possibilités techniques (mélanges interdits) ;
- collecter les effluents liquides à la source, utiliser des réservoirs de reprise permettant les contrôles ;
- pouvoir homogénéiser le contenu des réservoirs et prendre des échantillons ;
- réduire les volumes de déchets ;
- traiter les déchets *in situ* ou être en mesure d'expédier vers les exutoires externes ;
- pouvoir expédier vers un centre de traitement et conditionnement externe ;
- pouvoir accueillir des unités mobiles de traitement et conditionnement.

Pour ce qui concerne les effluents liquides potentiels, l'Andra identifie les eaux usées, les eaux d'exhaure des zones en exploitation, les eaux pluviales et les eaux d'extinction d'incendies. Les schémas de principe de gestion de ces effluents sont présentés dans le dossier en distinguant la zone puits de la zone descendrière.

Pour ce qui concerne les effluents gazeux, l'Andra ne présente pas les principes de leur gestion à ce stade. Ceci sera donc examiné pour la [DAC](#).

S'agissant des déchets solides, l'Andra indique que leur gestion sera décrite dans les [RGE](#) de [Cigéo](#) en rappelant, d'une part les dispositions pour en limiter le volume et la toxicité (reposant essentiellement sur un choix optimisé des matériaux et sur le confinement des substances contaminantes), d'autre part les processus de collecte, de conditionnement, de zonage et de contrôles radiologiques. Le zonage des déchets différenciera les locaux engendrant des déchets conventionnels de ceux générant des déchets nucléaires. L'Andra précise par ailleurs que le classement des zones sera effectué lorsque les plans de conception des installations seront définis de manière plus détaillée. Pour les déchets conventionnels, l'Andra envisage pour les phases de construction et de démantèlement l'emploi de bennes de collecte dont l'emplacement est fonction des contraintes de chantier. Pour la période d'exploitation, le positionnement des points de collecte dédiés à l'entreposage (avant évacuation) tient compte des zones de production des déchets dans l'installation et de l'accessibilité depuis l'extérieur. Pour les déchets nucléaires, l'Andra précise que les installations produiront essentiellement des déchets technologiques liés à l'exploitation et à la maintenance des installations elles-mêmes et indique que l'inventaire complet de tous les objets ou composants susceptibles d'être activés et/ou contaminés sera effectué dans une phase ultérieure du projet. A ce stade, les opérations identifiées comme susceptibles de générer des déchets sont les suivantes :

- réalisation des contrôles de non contamination ;
- décontamination des colis ;
- traitement des colis de stockage en écart ;
- analyses au laboratoire « chaud » ;
- maintenance et jouvence des équipements en zone de déchets nucléaires ([ZDN](#)) ;
- démantèlement des locaux classés [ZDN](#) ;
- changement des filtres de ventilation ;

- dépotage dans le local à effluents.

Pour la période d'exploitation, les déchets nucléaires sont triés au plus près de la source de production selon la nature physique, la catégorie radiologique et le spectre. Leur regroupement est réalisé au moyen de conteneurs adaptés à chaque type de déchet. Les déchets sont conditionnés sur la zone de production dans un fût métallique ou dans un sac vinyle dont l'épaisseur peut varier en fonction du risque radiologique. Ils sont ensuite évacués vers le local de traitement des déchets d'exploitation afin d'être traités sur site ou conditionnés dans des emballages adaptés à leur transport vers un centre de traitement externe ou vers un exutoire de stockage pour colis de déchets conditionnés (centres Cires ou [CSA](#), ou les centres futurs). Les opérations de traitement envisagées sont la décontamination, la réduction de volume et le conditionnement. Aussi, l'Andra prévoit que le local comprenne :

- des moyens de décontamination : frottis humides, bac à ultrasons, gels secs aspirables, jet haute pression, etc. ;
- des moyens de réduction de volume : table de découpe, scie circulaire, scie sabre, cisaille, poste plasma, grignoteuse, presse, etc. ;
- des moyens de conditionnement : casiers TFA ou FMA, fûts, soudeuse vinyle, etc. ;
- des équipements de manutention : pont ou monorail, palan, chariot, porte-fût, etc.

Pendant les opérations de démantèlement des installations de surface, les déchets volumineux sont prévus, si l'encombrement le permet, d'être collectés directement dans les caissons appropriés (fonction de la catégorie radiologique), en distinguant les natures physiques (déchets métalliques ou gravats). Un suivi comptable des volumes de déchets produits sera réalisé et fera l'objet de bilans annuels et d'une étude déchets. Pour ce qui concerne leur confinement, l'Andra indique [39] que le premier système de confinement des effluents liquides actifs ou douteux est constitué par les cuves et réseaux les collectant, sans préciser les dispositions mises en place pour la maîtrise des risques de dispersion de ces substances radioactives.

Les principes de gestion des effluents et des déchets générés par l'installation [Cigéo](#) n'appellent pas de remarque. Toutefois, s'agissant en particulier des eaux d'exhaure des zones en exploitation, l'IRSN estime que la demande de l'ASN 2015 D8 [1] de préciser les modalités de gestion des eaux d'exhaure des alvéoles [HA](#) reste d'actualité.

7.4.2 SURVEILLANCE DES EAUX DE SURFACE ET SOUTERRAINES

L'Andra [39] indique que les exutoires envisagés pour les eaux issues du site (cf. chapitre 7.4.1 ci-dessus) sont :

- l'Orge (via la Bureau) pour les eaux pluviales de la zone descendrière ;
- l'Ormançon pour les eaux pluviales issues de la zone puits et, après contrôle et traitement, pour les eaux ayant été au contact avec les matériaux excavés (les verses) ;
- la Marne, distante d'une dizaine de kilomètres, pour effluents liquides et les eaux usées, après contrôle et traitement.

L'Andra [39] présente les cours d'eau passant à proximité du site, l'Orge et de l'Ormançon, mais sans en préciser les caractéristiques débitométriques pourtant disponibles par ailleurs [73][74][75]. L'Orge fait l'objet d'un suivi en continu en aval du Laboratoire souterrain (station de Biencourt-sur-Orge) et présente des débits variant entre 0 et 5,5 m³/h et un débit médian de quelques centaines de litres par seconde.

L'IRSN observe que l'évolution du débit sur ces cours d'eau présente de fortes fluctuations liées aux apports et aux pertes karstiques des calcaires du Barrois. Ainsi qu'indiqué au chapitre 4.6.1.1 relatif aux couches aquifères du Barrois, il est nécessaire de mieux connaître ces circulations karstiques. En effet, il en résulte qu'en aval de Cigéo, leur écoulement n'est pas pérenne avec, par endroit, l'assèchement de leur lit en période peu pluvieuse et en période estivale. Pour l'IRSN, ces éléments de contexte hydrologique, complétés par l'Andra en cours d'instruction, appellent les trois commentaires suivants pour le dossier de DAC.

En premier lieu, l'IRSN souligne la nécessité de présenter les caractéristiques débitométriques avec *a minima* le débit moyen au pas mensuel, le débit mensuel quinquennal sec⁹⁵ et les intervalles de confiance à 95 % associés. En effet, compte tenu des variations saisonnières de débit, la réglementation retient la période d'étiage afin de considérer des conditions de dilution défavorables pour définir les niveaux de rejet en termes de concentrations de polluants physico-chimiques ;

En second lieu, l'IRSN estime qu'il est nécessaire d'adapter la dynamique des rejets à l'occurrence de périodes d'assèchement des cours de l'Orge et de l'Ormançon. L'IRSN relève la présence d'une zone Natura 2000 sur le cours de l'Orge en aval du point de rejet envisagé pour les eaux collectées au droit de la zone de dépôt des verses. Les dispositions à prendre devraient ainsi viser le maintien des conditions actuelles d'écoulement et de qualité des eaux.

Enfin, l'Andra [39] ne présente pas de recensement des usages de l'eau en aval des installations. En particulier, l'IRSN relève que le captage d'AEP de Bar-le-Duc, implanté à Fains-les-Sources, est notamment alimenté par des pertes karstiques sur la Saulx, en aval de sa confluence avec l'Orge.

L'IRSN estime que l'Andra devra présenter, dans le dossier de DAC, les caractéristiques des cours d'eaux envisagés comme exutoires des effluents d'exploitation (débits caractéristiques et qualité des eaux), les dispositions permettant d'assurer la compatibilité des rejets dans ces cours d'eau (volume et qualité), notamment pour la zone des verses, ainsi que les impacts sur les usages de l'eau en aval. Ce point fait l'objet de l'engagement E63-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

En outre, compte tenu des interactions existant entre les cours d'eau et les calcaires du Barrois, l'IRSN a examiné les modalités de surveillance des eaux souterraines qu'il serait pertinent de mettre en place autour des installations de Cigéo.

Au stade du DOS, l'Andra n'a pas présenté de dispositions particulières relatives à la future surveillance des nappes des calcaires du Barrois autour des installations de Cigéo. L'Andra met l'accent sur l'acquisition de données piézométriques complémentaires au droit de chaque zone et a indiqué réfléchir à la mise en place d'une surveillance (débit, qualité des eaux) de sources présentes en aval des zones, de façon à disposer d'outils de surveillance intégrateurs d'un secteur particulier. **Ces points n'appellent pas de remarque de l'IRSN à ce stade.** Cependant, l'IRSN estime que le dossier de DAC devra présenter une préfiguration des dispositions de surveillance des nappes des calcaires du Barrois permettant de s'assurer :

- d'un suivi des niveaux piézométriques permettant de disposer :
 - d'une connaissance suffisante des écoulements souterrains autour des installations ;

⁹⁵ Débit mensuel minimum, statistiquement dépassé (à la baisse) pour un mois donné une année sur cinq.

- de l'acquisition de données permettant d'attester de la pertinence de l'évaluation des niveaux extrêmes en cas de remontée de nappe ;
- d'un suivi des évolutions piézométriques au voisinage des liaisons jour-fond ;
- d'un suivi de la qualité des eaux souterraines en amont et en aval des installations de surface susceptibles de générer des relâchements de substances radiologiques ou chimiques dans les terrains.

A ce titre, l'IRSN estime que l'Andra devra évaluer les risques de relâchements liés à la lixiviation des verses par les eaux pluviales, les modalités de gestion adoptées pour limiter ces risques, en s'appuyant notamment sur des résultats d'essais de lixiviation ainsi que sur le retour d'expérience de l'exploitation du Laboratoire souterrain. En particulier, l'IRSN relève que, d'après les éléments transmis en cours d'instruction, les lixiviats issus des verses contiennent de fortes concentrations en sulfates (1 à 5 g/L) et en sodium (> 1 g/L) et que la surveillance réglementaire du Laboratoire souterrain fait apparaître un surcroît de sulfates dans les eaux des calcaires du Barrois en aval du site. Cette évolution dans les eaux souterraines pourrait être imputable aux verses. De plus, la présence dans les argilites mises en verses d'arsenic (11 µg/g, mobile et très toxique), d'uranium (2,1 µg/g) et d'autres métaux est un point nécessitant une évaluation quantitative et le cas échéant une surveillance adaptée.

Avec le réseau de piézomètres existant et la réalisation de nouveaux piézomètres, l'IRSN observe que l'Andra devrait disposer d'un nombre d'ouvrages suffisant pour définir un réseau de piézomètres de surveillance des eaux souterraines autour des installations de surface de Cigéo. Cependant, compte tenu du caractère fissural et karstique des calcaires du Barrois, ainsi qu'indiqué au chapitre 4.6.1.1, l'IRSN encourage l'Andra à poursuivre l'acquisition des connaissances sur les nappes des calcaires du Barrois, notamment *via* le réseau piézométrique qu'elle a mis en place.

Aussi, l'IRSN estime que l'Andra, dans le dossier de DAC devra :

- établir un état préliminaire de référence des eaux souterraines ;
- identifier les installations de surface (nucléaires, non nucléaires dont les verses) susceptibles de générer des relâchements de substances radiologiques ou chimiques dans les eaux superficielles ou souterraines et dans l'atmosphère, relâchements qui seront identifiés, quantifiés et soumis à autorisation ;
- et, en regard, présenter les modalités de surveillance (point, fréquence de mesure et paramètres suivis) des nappes des calcaires du Barrois qu'elle propose de mettre en œuvre autour des installations cibles.

Ce point fait l'objet de l'engagement E59-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

7.5 EVALUATIONS D'IMPACT

7.5.1 SITUATIONS DE DIMENSIONNEMENT

7.5.1.1 Evaluation des conséquences des situations incidentelles et accidentelles sur les travailleurs

L'Andra ne présente pas l'évaluation des conséquences des situations incidentelles ou accidentelles sur les travailleurs. Elle a précisé au cours de l'instruction que « *les scénarios présentés dans le DOS ne génèrent pas d'impact sur les travailleurs compte tenu du fait que l'exploitation du stockage est automatisée avec du personnel situé dans une salle de conduite centralisée, éloignée des cellules et des équipements contenant les colis de déchets radioactifs* ». Elle a précisé que « *les évaluations des conséquences radiologiques sur les travailleurs seront effectuées dans les études de l'APD si des scénarios ayant un impact potentiel sur du personnel sont le cas échéant identifiés* ». En outre, l'Andra indique [39] que « *la conception fera que le traitement des situations incidentelles ou accidentelles ne devra pas nécessiter l'intervention des opérateurs ou du personnel de secours dans les locaux où l'exposition dépasse les seuils réglementaires* ». L'IRSN estime qu'au stade du **DOS**, les opérations d'intervention du personnel en situation incidentelle ou accidentelle ne peuvent être exclues dans la mesure où l'Andra n'a pas achevé les études de conception permettant de répondre à l'objectif précité. A cet égard, l'IRSN observe, sans préjuger des résultats de l'Andra à l'échéance de la **DAC**, que le retour d'expérience des installations nucléaires montre la grande difficulté à exclure toute intervention humaine par conception en de telles situations.

Aussi l'IRSN estime que l'Andra devra présenter, dans le dossier de **DAC**, les scénarios d'intervention post incident/accident retenus ainsi que les évaluations préliminaires de la dosimétrie pour le personnel intervenant dans ces scénarios. Ce point fait l'objet de l'engagement E62-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

7.5.1.2 Evaluation de l'impact sanitaire en situation de dimensionnement

Evaluation de l'impact sanitaire des rejets d'effluents radioactifs

L'Andra ne présente pas d'évaluation de l'impact sanitaire des rejets d'effluents radioactifs pour le fonctionnement normal de l'installation, demandée par l'ASN [2]. Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué avoir réalisé une évaluation, actuellement en cours de révision. L'Andra n'a pas transmis le détail de cette évaluation. L'Andra a cependant réalisé pour le **DOS** une évaluation « enveloppe » d'impact des rejets d'effluents gazeux pour des populations de différents villages à proximité, en retenant (i) le dégazage maximal des colis, calculé en prenant le taux maximal d'admissibilité par colis multiplié par l'inventaire complet de **Cigéo** (*i.e.*, en considérant que tous les colis sont stockés) et (ii) les aérosols provenant de la mise en suspension de la contamination surfacique labile des colis, quantifiés en considérant la contamination surfacique maximale admissible par colis et appliquant les facteurs de mises en suspension et de filtration associés. La dose efficace maximale ainsi calculée est de l'ordre de 1,5 µSv pour le groupe multi-activités à Bure (qui considère un comportement moyen des populations). La dose est essentiellement due à la contribution du ¹⁴C puis du tritium par ingestion, équivalente à celle par inhalation. L'Andra a réalisé une étude de sensibilité prenant en compte différents types de comportements alimentaires ; celle-ci montre que la dose maximale (facteur 2 environ) est obtenue pour le groupe villageois jardinier, à savoir celui dont les comportements alimentaires sont basés sur une consommation de fruits et légumes auto-produits. Concernant la composition isotopique des effluents gazeux, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction assimiler les

émetteurs α au ^{239}Pu et les émetteurs β/γ au ^{90}Sr pour ses calculs d'impact. Selon l'IRSN, le très faible impact des rejets est plausible, néanmoins l'Andra présente ces hypothèses comme pénalisantes sans toutefois les justifier. L'IRSN rappelle qu'une étude d'impact doit être fondée sur les limites de rejet de l'installation, elles-mêmes établies à partir d'un inventaire exhaustif des radionucléides susceptibles d'être rejetés par l'installation. L'étude de l'impact sanitaire des rejets d'effluents gazeux pour le fonctionnement normal de l'installation sera donc évaluée sur la base d'une présentation détaillée des hypothèses de calcul pour la DAC.

L'Andra ne mentionne pas d'évaluation de l'impact des rejets d'effluents liquides en situation normale produits par l'installation, alors que des effluents liquides seront produits pendant la phase d'exploitation [39]. L'IRSN rappelle que l'évaluation de l'impact sanitaire des rejets d'effluents doit être réalisée pour l'ensemble des effluents radioactifs susceptibles d'être rejetés par l'installation. **Ainsi que précisé dans le décret « procédure » n°2007-1557 du 2 novembre 2007 [139], l'Andra devra présenter dans le cadre de la DAC l'évaluation de l'impact sanitaire des rejets d'effluents radioactifs liquides et gazeux pour le fonctionnement normal de l'installation de la phase d'exploitation.**

L'Andra évalue enfin l'impact sanitaire des rejets d'effluents radioactifs en situations incidentelles et accidentelles, sur la base de cinq scénarios identifiés comme enveloppes lors de l'analyse des risques pour les installations en surface et l'installation souterraine. Les doses efficaces calculées à court terme (durée d'exposition égale à la durée de la situation) et à long terme (durée d'exposition égale à la durée de vie de la personne exposée) sont inférieures à 1 mSv. L'Andra précise l'essentiel de ses hypothèses ainsi que l'outil de calcul utilisé, mais ne détaille pas ses résultats. En particulier, l'Andra ne précise pas si l'évaluation comprend à la fois les rejets gazeux et liquides. **Dans le cadre de l'examen de la DAC, l'Andra devra présenter l'ensemble des résultats détaillés de l'évaluation pour les situations incidentelles et accidentelles. L'IRSN appelle l'attention sur les doutes qui pèsent encore sur les scénarios retenus par l'Andra, en particulier au regard des remarques majeures relatives aux colis d'enrobés bitumineux présentés aux chapitres 7.2.1.2 et 7.2.1.7.**

Evaluation de l'impact sanitaire des rejets de substances chimiques

L'Andra n'a pas réalisé d'évaluation quantitative de risque sanitaire (EQRS) afin d'estimer l'impact des substances chimiques rejetées par l'installation pendant la phase d'exploitation. Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué avoir à ce jour sélectionné une méthodologie d'évaluation de l'impact des substances chimiques pour le fonctionnement normal de l'installation, basée sur la méthode définie dans le guide INERIS publié en 2003 [125] et précisée en 2013 [126]. En particulier, l'Andra a précisé que l'évaluation de l'impact des substances chimiques en fonctionnement normal à accidentel sur la population se déroule en 4 étapes :

- L'identification des dangers pour les substances chimiques retenues,
- La recherche des relations dose-réponse (la relation dose-réponse est une relation quantitative entre la dose en toxique administrée et l'incidence de l'effet indésirable). Elle s'exprime sous la forme de Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR),
- L'évaluation des expositions *via* l'outil de modélisation des rejets,
- La caractérisation des risques mettant en relation les niveaux d'exposition estimés avec les VTR retenues

L'IRSN n'a pas de commentaire sur ces grands principes, conformes au guide de l'INERIS.

Concernant les situations incidentelles et accidentelles, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction avoir retenu une méthodologie d'évaluation « *permettant de démontrer que l'ensemble des risques non radiologiques potentiels ont été identifiés, traités et que leurs conséquences sont acceptables* ». L'IRSN rappelle que dans le cadre d'un **DOS** comme d'une **DAC**, l'objectif d'une **EQRS** est d'estimer les risques sanitaires potentiellement encourus par les populations voisines attribuables aux émissions futures de l'installation, afin :

- de vérifier que les conditions et les niveaux d'émissions permettent de maintenir un niveau de risque non préoccupant ;
- d'évaluer le risque sanitaire et de hiérarchiser les substances, les sources et les voies de transfert qui contribuent à ce risque, à contrôler en priorité ;
- d'identifier les populations susceptibles d'être le plus impactées, à surveiller en priorité et à protéger le cas échéant.

L'IRSN rappelle qu'une **EQRS** doit être réalisée à partir d'un inventaire exhaustif des substances rejetées par l'installation pour l'ensemble des effluents. Elle doit tenir compte, le cas échéant, des concentrations déjà présentes dans l'environnement, pour les substances d'intérêt rejetées par l'installation (impact cumulé). Au titre du décret « procédure » précité [139], l'Andra devra présenter dans le cadre de la **DAC** l'évaluation de l'impact sanitaire des rejets de substances chimiques de l'installation, en fonctionnement normal et en situation accidentelle de la phase d'exploitation. **L'impact des rejets cumulés de substances chimiques est par ailleurs un attendu de la DAC selon l'Article R 122-5 du Code de l'environnement.**

7.5.1.3 Evaluation de l'impact environnemental en situation de dimensionnement

L'Andra ne présente pas d'évaluation de l'impact environnemental des rejets radioactifs et chimiques pour la phase d'exploitation permettant d'apprécier et de décrire les incidences notables directes et indirectes sur la biodiversité, les terres, le sol, l'eau..., au sens de l'article L122-1 du Code de l'Environnement. L'IRSN rappelle que cette demande a déjà été formulée par l'ASN en 2014 (2014 D23 [1]) pour les substances radioactives, sur l'homme et l'environnement ; elle reste donc d'actualité.

Ainsi que précisé dans la réglementation [139], pour la phase d'exploitation, l'Andra devra présenter dans le cadre de la **DAC** l'évaluation de l'impact environnemental des substances radioactives et chimiques rejetées par l'installation.

7.5.2 SITUATIONS DE DIMENSIONNEMENT DU PUI

Comme pour les situations de dimensionnement, l'Andra ne présente pas l'évaluation des conséquences des situations accidentelles sur les travailleurs. Ceci est donc un attendu du dossier de **DAC**, accompagné de la définition de l'ensemble des postes de travail permanent et occasionnel.

L'Andra [39] présente une évaluation de l'impact sanitaire des sept scénarios de situations d'extension de dimensionnement étudiés ; l'impact maximal à long terme calculé, correspondant au scénario d'incendie du pont stockeur en alvéole MAVL impliquant un colis de stockage, est inférieur à 10 mSv. **L'IRSN n'a pas de remarque particulière à ce stade sur les premiers éléments présentés par l'Andra, mais signale qu'il est nécessaire que l'Andra transmette des compléments d'information sur les hypothèses prises en compte dans les calculs effectués pour évaluer leur pertinence.**

En outre, l'IRSN rappelle les très fortes réserves sur la possibilité d'exclure un scénario lié à un incendie dans l'alvéole MAVL ayant des conséquences beaucoup plus sévères que celui retenu (cf. chapitre 7.2.1.7).

Par ailleurs, l'Andra ne présente pas d'évaluation des conséquences non radiologiques associées à ces scénarios. A cet égard, l'Andra a indiqué lors de l'instruction qu'une évaluation des risques et des conséquences associés à la présence de substances dangereuses dans l'installation sera présentée dans le dossier accompagnant la DAC, ce qui est satisfaisant. L'IRSN rappelle qu'il considère, à l'instar des situations de dimensionnement (cf. chapitre 7.5.1), qu'une évaluation des conséquences environnementales devra également être présentée.

8 EVALUATION DE SURETE EN PHASE APRES FERMETURE

Le présent chapitre porte, dans une première partie (chapitre 8.1), sur l'analyse des principaux risques après la fermeture du stockage que sont la criticité et les séismes. Dans une deuxième partie (chapitre 8.2), la capacité globale de confinement du stockage après fermeture est évaluée, au travers de scénarios d'évolution normale et altérée puis d'études de sensibilité, au regard de la capacité des principaux composants du stockage à assurer les fonctions de sûreté qui leur sont assignées.

8.1 ANALYSE DES RISQUES DANS LES INSTALLATIONS SOUTERRAINES

8.1.1 RISQUE D'ORIGINE INTERNE : CRITICITE

Pour ce qui concerne la maîtrise du risque de criticité après fermeture pour les déchets de l'inventaire de [Cigéo](#), l'Andra considère que la conception des alvéoles permet de limiter le relâchement et la migration des radionucléides ou encore les phénomènes de re-concentration de la matière fissile par la limitation des vides. L'Andra indique que l'analyse de la maîtrise du risque de criticité après fermeture pour les déchets de l'inventaire de [Cigéo](#) sera apportée à la [DAC](#). L'Andra a précisé au cours de l'instruction qu'il sera étudié, le cas échéant, le besoin d'analyser les conséquences d'un accident de criticité. **Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.**

Pour ce qui concerne la démonstration de la sous-criticité du stockage après fermeture dans l'éventualité d'un stockage de combustibles usés, la démarche présentée par l'Andra [47] reprend celles présentées dans le « Dossier 2005 » puis dans le « Dossier 2009 ». L'Andra a précisé, au cours de l'instruction, que l'évaluation des conséquences d'un accident de criticité après fermeture n'a pas évolué par rapport à celle présentée lors du « Dossier 2005 ». **Aussi l'IRSN estime que l'ensemble des observations formulées lors des examens des « Dossier 2005 » et « Dossier 2009 » restent d'actualité.** En particulier, l'IRSN note que l'Andra n'a pas présenté d'analyse des quantités d'hydrogène formées par radiolyse de l'eau durant un accident de criticité. A cet égard, l'IRSN rappelle qu'il avait estimé en 2005 [13] que l'Andra devait « examiner [...] si ce phénomène peut contribuer de façon importante à la formation d'une phase gazeuse dans un stockage conjointement et au-delà de celle attendue du fait notamment des processus de corrosion en milieu anoxique ».

8.1.2 RISQUE D'ORIGINE EXTERNE : SEISMES

La détermination de l'aléa sismique pour la période après fermeture du stockage permet d'évaluer l'impact des mouvements sismiques pouvant survenir sur cette période de plusieurs centaines de milliers d'années, à la fois sur les composants du stockage fermé et sur l'environnement géologique du site. Aussi, les composants du stockage jouant un rôle dans la sûreté après fermeture doivent être dimensionnés pour résister à de tels séismes. De même, il convient d'identifier les éventuels effets des séismes sur le milieu géologique à long terme, et de les considérer en tenant compte de scénarios d'évolutions normale et altérées afin d'évaluer la robustesse de la conception du stockage comme indiqué dans le Guide de l'ASN relatif au stockage géologique [3]. Ce Guide précise, pour l'équivalent du [SEN](#), que des incertitudes existent sur les niveaux sismiques possibles sur des périodes sensiblement

supérieures à la période historique⁹⁶ ; pour en tenir compte, plusieurs approches, éventuellement croisées, pourront être retenues en relation avec le contexte sismotectonique. Il précise en outre que, pour des situations altérées, correspondant aux SEA, les caractéristiques du séisme maximal physiquement possible (SMPP) doivent être recherchées sur la base du contexte tectonique du site.

L'Andra a défini un SMPP pour la phase après fermeture au stade du DOS [39]. En outre, l'Andra a transmis au cours de l'instruction, un document présentant les études déterministes et probabilistes en cours pour la DAC. Ces estimations sont analysées successivement ci-dessous, ainsi que les conséquences de séismes sur la sûreté après fermeture.

8.1.2.1 Analyse déterministe

La démarche pour élaborer le spectre de niveau SMPP présentée dans le DOS [39] considère toutes les failles comme actives et accumulant des contraintes jusqu'à générer des séismes caractéristiques de leur dimension. L'Andra retient, à l'issue de cette démarche [40], pour la phase après fermeture un spectre dit « spectre SMPP 2004 », calculé sur le site du Laboratoire souterrain et présenté dans le « Dossier 2005 ». L'IRSN relève que ce spectre était issu d'une approche déterministe pondérant trois modèles sismotectoniques, dont un s'appuyant sur la dimension des failles cartographiées dans le secteur et deux fondés sur la sismicité (mesurée et observée). L'IRSN rappelle que ce spectre ne tenait alors compte de la dimension des failles que de façon marginale (10 %). A cet égard, l'IRSN concluait en 2005 qu'il ne pouvait pas être considéré comme majorant [13]. A l'issue de l'instruction du « Dossier 2009 », l'IRSN [16] considérait que le choix par l'Andra de déterminer le spectre de référence pour la phase après fermeture à partir de différents modèles sismotectoniques était pertinent mais qu'au moins l'un de ces modèles devait être basé sur une analyse de la dimension et de la segmentation des failles du secteur de MHM. En tout état de cause, le poids attribué à chacun des modèles, en particulier à celui considérant la dimension des failles, se devait d'être justifié (cf. engagement 2010 E15.1 [1]). **L'IRSN constate que ce spectre d'aléa sismique présenté dans le DOS n'a pas fait l'objet d'une révision ou justification supplémentaire ; aussi, dans le cas où il serait maintenu en référence pour la DAC (cf. étude présentée en vue de la DAC ci-dessous), l'engagement 2010 E15.1 resterait d'actualité.**

L'IRSN rappelle par ailleurs sa conclusion du chapitre 4.3 selon laquelle il ne peut être exclu que le contexte tectonique puisse être modifié au cours du prochain million d'années. De plus, le Guide de l'ASN relatif au stockage géologique [3] préconise que la phase après fermeture tienne compte des évolutions climatiques majeures. Or, les cycles climatiques, les surcharges et décharges glaciaires (ou même l'eustatisme) associés sont susceptibles de perturber l'état de contrainte à l'emplacement mais aussi à distance des calottes glaciaires, en particulier dans les zones de flexuration (ou de relaxation de ces flexures) à distance de ces glaciers. Par exemple, l'hypothèse de l'effet de la déglaciation a été proposée pour la sismicité remarquable de la région de New Madrid (USA) dans un secteur où aucune déformation (y compris depuis le Crétacé) n'est mise en évidence (Zoback & Grollmund, 2001 [111]). De plus, Calais et al (2016 [144]) suggèrent que la sismicité intraplaque ne résulte pas du chargement tectonique aux frontières de plaques des zones continentales stables mais peut être expliquée par l'effet de sollicitations transitoires liées à des phénomènes tels que les surcharges/décharges glaciaires ou l'érosion. L'IRSN estime donc que le cas d'éventuelles perturbations liées à ces cycles climatiques nécessite d'être examiné par

⁹⁶ Durée des mesures instrumentales de la sismicité d'ordre centenaire et d'observations (paléoséismes...) d'ordre millénaire

l'Andra dans le cadre de l'élaboration du SMPP, notamment sur la base de la littérature scientifique ainsi que du retour d'expérience des études relatives au stockage de déchets radioactifs à long terme dans les pays scandinaves ou au Canada, qui connaissent une activité sismique notable liée à la décharge glaciaire du Quaternaire. L'IRSN estime que cette incertitude sur des modifications du champ de contraintes, notamment en lien avec les futures phases glaciaires, devrait conduire l'Andra à fonder son évaluation du SMPP et donc la réponse à son engagement E 15.1 (cf. ci-dessus) sur les dimensions des failles essentiellement.

L'IRSN estime que l'Andra devra justifier, dans le dossier de DAC, le spectre de niveau SMPP retenu en regard en particulier d'une possible évolution des contraintes tectoniques, notamment en lien avec les futures périodes glaciaires, au cours du prochain million d'années. Ce point fait l'objet d'une partie de l'engagement E64-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

Afin d'éclairer ce spectre SMPP retenu au stade du DOS en prévision de la DAC et de le juger au regard de l'évolution des connaissances, l'Andra a conduit une nouvelle évaluation [108][109] basée sur deux modèles :

- un « modèle structural régional » prenant en compte les failles du modèle structural de MHM qui présentent les plus grandes dimensions⁹⁷ (failles de Poissons, de La Marne, de Gondrecourt et de Vittel), extraites du modèle structural et régional révisé [56],
- un « modèle de séisme flottant » considérant un séisme pouvant se produire de manière équiprobable dans un rayon de 20 km autour du site et se produisant à une profondeur entre 5 et 15 km, soit dont le foyer est entre 5 et 25 km.

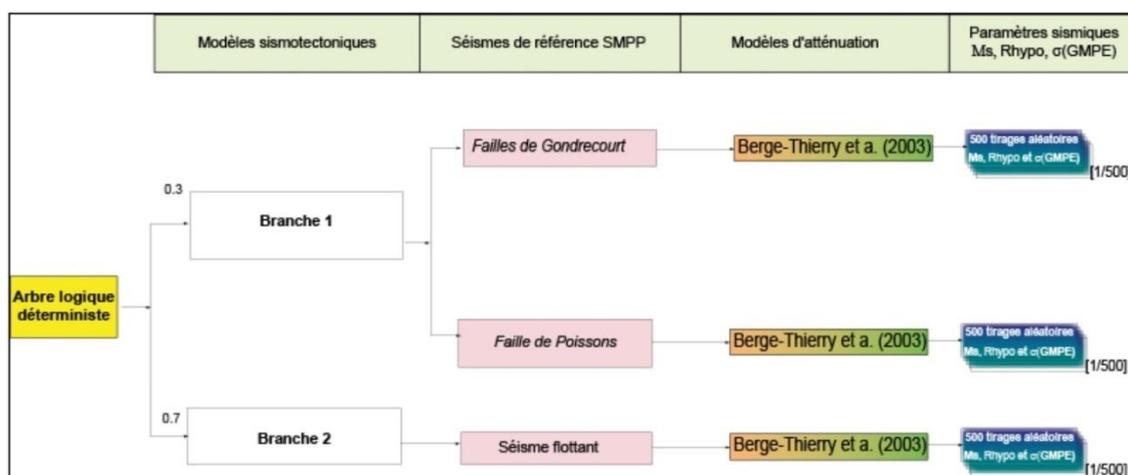


Figure 77 : Arbre logique déterministe considéré par l'Andra pour le calcul du niveau SMPP sur le site de Cigéo [108]. Branche 1 : « modèle structural régional » ; branche 2 : « modèle structural régional ».

Pour ce qui concerne le « modèle structural régional », l'Andra a calculé, pour les quatre failles (Gondrecourt, Poissons, Marne, Vittel), des magnitudes et les incertitudes associées sur les dimensions de ces failles. Sur cette base, et constatant que pour les failles de Poissons, Marne et Vittel, les magnitudes SMPP sont équivalentes (6,5), l'Andra ne retient que la faille de Poissons (de ces trois failles la plus proche des installations de Cigéo) ainsi que la faille de Gondrecourt (encore plus proche et de magnitude de 4,9). Les caractéristiques des séismes associés aux

⁹⁷ La magnitude des séismes dépendant de la dimension (longueur et hauteur) de la faille mobilisée (Wells & Coppersmith, 1994 [143]), l'activation des autres failles du secteur, telles que Joinville ou Bressoncourt, conduirait à des séismes de plus faible magnitude.

failles sont présentées dans le Tableau 25. Les spectres de réponse correspondant à la contribution de chacune de ces deux failles sont calculés par 500 tirages aléatoires considérant la variabilité de la magnitude, de la distance hypocentrale et de l'équation de prédiction du mouvement sismique « GMPE⁹⁸ » de la RFS 2001-01. Au final, le spectre calculé correspond à l'enveloppe des spectres associés à chacune des failles (pour les différents percentiles 16, 50 et 84 %). Ceci est réalisé pour quatre localisations sur le site de **MHM** considérées (Laboratoire souterrain, zone descenderie, zone puits, zone **MAVL**, cf. Figure 3). À titre d'exemple, les spectres obtenus pour la localisation « descenderies », correspondant à la contribution individuelle des « sources » correspondant à la faille de Poissons et à la faille de Gondrecourt sont présentés en Figure 78.

Source	Ms max	Distance hypocentrale au laboratoire souterrain (km)	Distance hypocentrale à la zone de descenderie (km)	Distance hypocentrale à la zone des puits (km)	Distance hypocentrale à la zone MAVL (km)
Gondrecourt	4,9 ± 0.2	6 ± 1	7 ± 0	7 ± 1	5 ± 1
Poissons	6,5 ± 0.2	13 ± 3	13 ± 4	16 ± 3	17 ± 2

Tableau 25 : Caractéristiques considérées pour établir les spectres SMPP du modèle par faille (branche 1 de l'arbre logique de la Figure 77) [108].

Pour ce qui concerne le « modèle de séisme flottant », l'Andra calcule, par tirage aléatoire (variabilité de la magnitude, de la distance hypocentrale et de la GMPE), des spectres de réponse (aux percentiles 16, 50 et 84 %) correspondant à des séismes de magnitudes comprises entre 5,5 et 6,0 dont le foyer est en moyenne à 15 km (cf. ci-dessus). Ce modèle n'étant pas dépendant de la distance aux failles du secteur, il conduit à un même spectre pour les quatre localisations sur le site de **MHM** considérées ; le spectre correspondant à ce séisme flottant est présenté en Figure 78.

À partir des spectres issus des deux modèles précédemment décrits, l'Andra calcule le niveau d'aléa final en attribuant un poids majoritaire (70 %) aux spectres déterminés à partir du « modèle de séismes flottants » et 30 % pour le modèle de failles (cf. Figure 77). L'Andra justifie le poids de 30 % attribué au modèle de failles du fait qu'elle considère l'absence d'activité tectonique sur les failles à l'échelle locale et régionale. Les spectres « SMPP après propagation des incertitudes » sont présentés en Figure 78.

⁹⁸ Ground Motion Prediction Equation

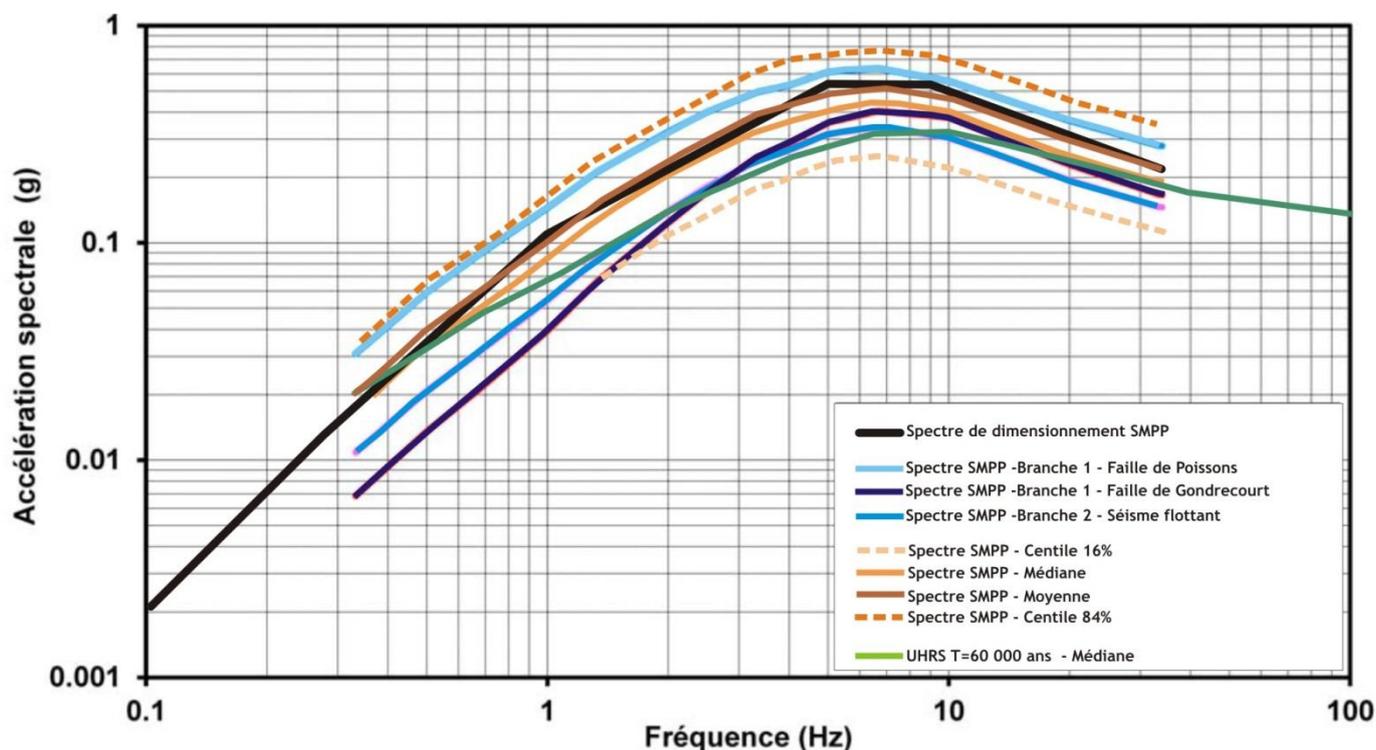


Figure 78 : « Spectre SMPP 2004 » de référence au stade du DOS (en noir) et spectres étudiés pour la DAC, pour la localisation « descendries » : évaluation déterministe (en orange) avec étude de sensibilité aux centiles 16, 50 et 84 % et spectres (valeurs moyennes) obtenus pour les 3 « sources » retenues ; évaluation probabiliste UHRS⁹⁹ à 60 000 ans (en vert) aux centiles 16, 50 et 84 % [108].

L'IRSN considère que la prise en compte du « modèle structural régional » est adaptée pour définir les caractéristiques du/des SMPP fondées sur la dimension des failles. Toutefois, ce « modèle structural régional » ne compte que de façon minoritaire (30 %), l'Andra privilégiant l'hypothèse selon laquelle les failles régionales (e.g., Vittel, Poisson, Marne, Gondrecourt) ont cessé toute activité. Or, l'Andra considère dans le DOS, « en accord avec la réglementation », que « toutes les failles pourraient être actives et seraient en train d'accumuler les contraintes jusqu'à la production de SMPP » [40]. En effet, si le contexte actuel reflète une très faible voire une inactivité des failles, l'IRSN estime qu'il ne peut être exclu que l'évolution de l'état de contraintes dans la croûte puisse subir une évolution notable au cours du prochain million d'années, en particulier en lien avec les cycles climatiques (cf. ci-dessus). Aussi, l'IRSN considère que le poids de 30 % attribué au « modèle structural régional » n'est pas justifié au regard du potentiel SMPP à l'échelle régionale.

Concernant la magnitude maximale attribuée aux failles régionales dans ce « modèle structural régional », l'IRSN considère que la limitation des magnitudes associées aux failles actives à l'échelle régionale à 6,5 pour l'ensemble des failles n'est pas justifiée. En particulier, pour la faille de Vittel, l'IRSN rappelle que lors de l'évaluation du « Dossier 2009 », il considérait que les caractéristiques des SMPP devraient être évaluées en prenant en compte la dimension maximale de cette faille et les relations empiriques liant la taille des failles et la magnitude d'un séisme associé (Wells & Coppersmith, 1994 [143]) et que d'après ces relations empiriques, un SMPP sur la faille de Vittel correspondrait *a minima* à un séisme de magnitude 7. En appui à cet argument, l'IRSN observe que d'après l'étude réalisée par l'Andra sur la segmentation de cette faille [56][69], certains segments définis ont un potentiel

⁹⁹ UHRS : Uniform Hazard Response Spectrum

sismogène allant jusqu'à 6,8, qui serait compatible avec le glissement cumulé sur les très longues périodes à considérer en tenant compte des vitesses de glissement proposées par l'Andra (typiquement -0,001 mm/an depuis l'Oligocène) [69]. De surcroît, les arguments présentés par l'Andra en faveur d'une segmentation de cette faille paraissent ténus. En particulier, les critères énoncés initialement pour définir les extrémités des segments de la faille [56] (différence d'orientation, intersection par une faille sécante, connexion complexe entre deux segments) ne sont pas vérifiés *in fine*, notamment entre les segments Vit1 et Vit2 et entre Vit3 et Vit4. Enfin, l'IRSN observe que la distance entre ces segments est bien inférieure à celle de quelques kilomètres considérée nécessaire, d'après la littérature récente (e.g., Biasi et al., 2016 [241] ; Wesnousky & Biasi, 2011 [242]), pour que la rupture associée à un séisme ne puisse se propager d'un segment de faille à un autre. **Aussi, afin de couvrir les incertitudes sur la segmentation de la faille de Vittel, l'IRSN considère que l'Andra devrait retenir pour cette faille un SMPP d'une magnitude au moins égale à celle qui peut être associée à son segment le plus long, soit une magnitude au moins de 7.**

Concernant le « *modèle de séisme flottant* », outre l'absence susmentionnée de justification du large poids (70 %) qui lui est attribué, les choix de l'Andra sur les caractéristiques qui lui sont associées (magnitudes, profondeurs) motivent les commentaires suivants de la part de l'IRSN. Pour ce qui concerne la gamme de magnitudes portée par ces sources locales, celle-ci est comprise entre 5,5 et 6,0, au motif qu'aucune structure de longueur suffisante pour générer des séismes de magnitude supérieure à 6 n'a été identifiée dans l'environnement du site sur la base des investigations géophysiques. Or, l'IRSN observe que ces investigations géophysiques ciblaient la couverture sédimentaire et non le socle sous-jacent ; il apparaît donc difficile de conclure sur l'absence de faille ou sur leur longueur. Par ailleurs, la profondeur minimale de ces séismes flottants de 5 km n'est pas cohérente avec la profondeur sismogénique minimale sous le site retenue dans l'étude, de 3 km. En outre, l'IRSN note que les hypothèses retenues pour définir la magnitude et la localisation du séisme flottant (par exemple la distance épacentrale jusqu'à 20 km) ne sont pas justifiées et pèsent de manière importante sur les spectres SMPP retenus *in fine*. **Aussi, l'IRSN estime que les caractéristiques retenues à ce stade pour les séismes flottants ne sont pas globalement justifiées.**

Enfin, l'IRSN rappelle que conformément à l'engagement 2013 E3.2 [1] qu'elle a pris à l'issue de l'instruction du dossier « Etudes remises depuis 2009 » [6], l'Andra doit vérifier pour la DAC que le spectre SMPP retenu couvre l'éventualité d'un séisme à l'aplomb du site dont le foyer se situerait à moins de 10 km de profondeur.

Pour conclure, l'IRSN considère que l'évaluation du niveau SMPP devrait être fondée sur la prise en compte de modèles de failles basés sur les études géologiques, tel que le « *modèle structural régional* » précité. Or, sur l'évaluation présentée par l'Andra en prévision de la DAC basée sur un « *modèle structural régional* » et un « *modèle de séisme flottant* », l'IRSN identifie des manques importants pour étayer à la fois les paramètres retenus dans chacun de ces deux modèles et les poids attribués à chacun des scénarios déduits de ces modèles. Ainsi, en l'état actuel des arguments présentés, l'IRSN considère qu'une approche prudente serait de retenir les spectres les plus pénalisants.

R3. L'IRSN recommande que l'Andra retienne, dans le dossier de DAC, le spectre enveloppe des deux hypothèses présentées (modèle structural régional et modèle du séisme flottant).

Enfin, à la lumière des éléments examinés à ce stade, l'IRSN estime qu'il conviendrait que ces évaluations soient complétées par :

- la justification des caractéristiques des séismes flottants retenus dans la construction du spectre SMPP ou utilisés pour vérifier le caractère enveloppe du SMPP ;
- une prise en compte de l'impact (ou la démonstration de l'absence d'impact) des surcharges glaciaires (et d'éventuelles variations eustatiques) sur la modification du régime des contraintes tectoniques.

8.1.2.2 Évaluation probabiliste de l'aléa sismique

Dans le contexte de réglementation actuelle applicable aux INB (e.g. RFS 2001-01 [99]), les méthodes probabilistes sont utilisées comme un outil d'estimation de l'aléa venant en complément des méthodes déterministes. Ainsi, pour ce qui concerne Cigéo, l'ASN a demandé à l'Andra, à l'issue de l'examen des « Commentaires de l'Andra sur le rapport de l'IEER » (2013 D6 [1]), de mettre en œuvre une estimation probabiliste de l'aléa sismique pour fournir un éclairage sur la période de retour des spectres déterministes. Par ailleurs, à l'occasion des évaluations complémentaires de sûreté mises en œuvre après la catastrophe de Fukushima, menant le cas échéant au dimensionnement des équipements et composants du « noyau dur », l'ASN a demandé aux exploitants d'utiliser les deux méthodes (déterministes et probabilistes) afin de retenir un niveau d'aléa enveloppe.

En prévision de la DAC, l'Andra a réalisé une nouvelle évaluation probabiliste de l'aléa sismique [108][109] conduisant à présenter des spectres à différents percentiles pour plusieurs périodes de retour. Réciproquement, l'évaluation probabiliste permet d'estimer les périodes de retour associées aux dépassements d'une accélération spectrale donnée. En particulier, les périodes de retour déterminées par l'Andra pour un aléa correspondant au « spectre SMPP 2004 » sont comprises, en valeur médiane, entre 59 000 ans et 400 000 ans en fonction des fréquences spectrales ; l'Andra retient une moyenne de 100 000 ans. **L'IRSN estime que cette évaluation probabiliste répond à la demande de l'ASN 2013 D6 précitée.** Néanmoins, l'étude présentée appelle les commentaires suivants. L'évaluation probabiliste de l'aléa sismique en exploitation comme après fermeture, présentée par l'Andra en prévision de la DAC, s'appuie sur certaines hypothèses et est bâtie sur un arbre logique constitué de branches à chacune desquelles l'Andra attribue un poids. Concernant les hypothèses retenues, l'IRSN observe que le catalogue de sismicité et les deux zonages sismotectoniques -le modèle GEOTER et le modèle IRSN- sont les mêmes que pour l'évaluation déterministe de l'aléa sismique en phase d'exploitation ; l'IRSN rappelle ses remarques formulées pour cette évaluation (cf. chapitre 7.3.1.1) sur la nécessité de consolider le catalogue de sismicité et d'explorer d'autres zonages disponibles et ayant conduit à l'engagement E55-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017. Les deux premières branches de l'arbre logique correspondent à ces deux modèles sismotectoniques GEOTER et IRSN ; l'Andra accorde un poids de 0,6 sur le premier car il « *résulte de [sa] propre interprétation et intègre les connaissances sur les failles à l'échelle locale et régionale* » [108]. L'IRSN a déjà présenté son avis sur le caractère insuffisant de cette justification présentée par EDF lors des instructions ECS [246] (de même que sur le choix de retenir différentes magnitudes maximales pour différents zonages et sur la méthode d'estimation des vitesses de glissement des failles) car il ne repose pas sur un critère de qualité du zonage ; l'IRSN indiquait qu'EDF aurait dû attribuer un poids égal à chaque hypothèse de zonage. Cette branche « modèle GEOTER » est ensuite divisée en deux, l'une considérant les failles actives avec un poids de 0,3, et l'autre non avec un poids

de 0,7, « *compte tenu des incertitudes qui pèsent sur l'estimation des taux de glissement des failles cartographiées* ». L'IRSN constate donc que ces poids conduisent à retenir, pour presque la moitié des tirages (0,6 x 0,7), une absence d'activité des failles du secteur et donc l'exclusion de structures sismogènes pouvant engendrer un séisme de magnitude supérieure à 6,0. L'IRSN rappelle sa remarque formulée ci-avant (chapitre 8.1.2.1) selon laquelle il ne peut être exclu que l'évolution de l'état de contraintes dans la croûte puisse subir une évolution notable au cours du prochain million d'années et ayant conduit à l'engagement E64-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017. **Aussi, l'IRSN invite l'Andra à reconsidérer les hypothèses ainsi que les poids attribués à ces hypothèses dans l'arbre logique de l'étude probabiliste pour la DAC, sur la base de ces remarques de l'IRSN. En outre il conviendrait que pour la DAC, l'Andra justifie, notamment par des études de sensibilité, chaque hypothèse retenue ou écartée pour le calcul probabiliste.** En effet, l'IRSN rappelle qu'un calcul d'aléa sismique probabiliste nécessite de définir et justifier les nombreux paramètres, modèles, sous-calculs et hypothèses utilisés qui ne sont pas tous présentés à ce stade, en particulier les justifications concernant des paramètres clés du calcul tels que magnitudes maximales, minimales, écart-type des équations prédictives du mouvement sismique, catalogues de sismicité, vitesse de glissement des failles, etc.

Pour ce qui concerne spécifiquement la période après fermeture, en liminaire, l'IRSN souligne la difficulté, voire l'inadéquation de l'utilisation d'un calcul probabiliste pour les très longues durées de vie de l'installation au regard de l'échantillon de sismicité disponible (catalogues des séismes répertoriés sur quelques centaines d'années pour prédire un aléa sismique pour une période de plusieurs centaines de milliers d'années) et de la faible connaissance relative à la vitesse de glissement des failles. **L'IRSN estime donc que les évaluations probabilistes de l'aléa sismique après fermeture devraient être conduites à titre exploratoire ; elles peuvent être par exemple examinées pour évaluer la sensibilité de la période de retour des niveaux sismiques obtenus par méthode déterministe.**

Concernant la période de retour de 100 000 ans associée au « spectre **SMPP 2004** », l'IRSN rappelle que la probabilité de dépassement d'un niveau de sollicitation sismique donné est fixée conventionnellement à 10 % pour des bâtiments « classiques » d'une durée de vie de 50 ans (période de retour de 475 ans), à 1 % pour les nouvelles ICPE de même durée de vie (période de retour de 4 975 ans) et à 0,5 % pour une **INB** d'une durée de vie du même ordre (période de retour de 9 975 ans) ; ce principe introduit une gradation en fonction de l'importance de l'ouvrage (risque normal, spécial et nucléaire). En poursuivant cette logique, ainsi que présenté dans le Tableau 26, l'ordre de grandeur de 100 000 ans de période de retour estimée par l'Andra pour le « spectre **SMPP 2004** » signifie que ce niveau de sollicitation a une probabilité de 10 % d'être dépassé sur une durée de 10 000 ans et est certain (99 % de probabilité) d'être dépassé pour des durées supérieures ou égales à 465 000 ans. En d'autres termes, la probabilité est très grande que l'installation de stockage subisse une sollicitation supérieure ou égale au niveau fixé par l'Andra (spectre probabiliste à 100 000 ans de période de retour) pendant la période durant laquelle il convient d'assurer la sûreté après fermeture du stockage. Pour cette raison, **l'IRSN considère qu'il conviendrait que pour la DAC, l'Andra justifie la pertinence d'un calcul d'aléa probabiliste à 100 000 ans de période de retour pour l'évaluation de sûreté du stockage après fermeture.**

Dv \ Pt	10.0 %	1.0 %	0.5 %	99.0 %
50	475	4975	9975	11
150	1424	14925	29925	33
10536	100000	1048328	2101938	2288
460517	4370869	45821058	91872953	100000

Tableau 26 : Calcul IRSN des temps de retour « TR » d'un aléa considéré en fonction de la durée de vie cible « Dv » d'une installation et de la probabilité de dépassement « Pt » de cet aléa. Ce calcul est fondé sur

l'hypothèse que la sismicité est un processus « poissonnien » : $TR = \frac{Dv}{Ln(1-Pt)}$

8.1.2.3 Conséquences de l'occurrence de séismes après fermeture

L'Andra indique que le risque lié aux effets d'un séisme est limité par le choix du site qui se trouve dans une zone de très faible sismicité. Les conséquences de séismes après fermeture sur les composants du stockage et sur le milieu géologique ne sont pas présentées par l'Andra à ce stade, qui précise que l'évaluation de ce risque sera consolidée pour la DAC.

Pour ce qui concerne le dimensionnement au séisme des composants ouvrages du stockage autres que la roche hôte, l'IRSN rappelle qu'au cours de l'instruction du « Dossier 2009 », l'Andra indiquait prévoir une mise à jour de son analyse pour la DAC. L'IRSN soulignait alors que **cette analyse nécessiterait d'être accompagnée d'une démonstration du comportement acceptable des ouvrages, en cas de séisme en phase après fermeture, au regard des fonctions de sûreté retenues sur le long terme.** Il conviendrait de prendre en compte les remarques formulées ci-avant (cf. chapitre 8.1.2) sur l'aléa sismique pour la phase après fermeture en amont de cette analyse.

Pour ce qui concerne l'effet des séismes sur le milieu géologique et hydrogéologique, notamment sur la roche hôte et sur les couches aquifères encaissantes, l'Andra présentait en 2009 la même analyse que dans le « Dossier 2005 ». Lors de l'examen du « Dossier 2005 » [13], l'IRSN soulignait la nécessité de dresser un bilan des connaissances sur l'effet de séismes équivalents au SMPP sur la barrière géologique. L'IRSN considérait que, compte tenu des difficultés probables pour quantifier précisément ces effets, une approche possible serait de postuler l'occurrence de tels séismes, d'évaluer leurs conséquences sur la sûreté et l'impact radiologique du stockage et d'apprécier, selon leur degré de vraisemblance, si des dispositions de conception particulières seraient nécessaires pour les pallier (par exemple le maintien d'une distance de garde entre les ouvrages et la projection verticale des éventuels indices de structures tectoniques sous-jacentes). L'IRSN estime à cet égard que les conséquences des effets possibles de tels séismes en termes de développement de failles et/ou de modification du régime hydraulique dans les aquifères encaissants du Callovo-Oxfordien pourraient être par exemple évaluées au travers :

- du scénario *What-if* considérant l'existence d'une discontinuité non détectée dans le Callovo-Oxfordien (cf. chapitre 6.2.3) demandé par l'ASN (2013 D3) [1], si l'Andra montre que les paramètres retenus (propriétés de la faille,...) couvrent les incertitudes relatives à l'effet de séismes de niveau SMPP ;
- d'un scénario prenant en compte une situation enveloppe de l'effet de l'évolution géoprospective vis-à-vis des écoulements dans les encaissants, que l'IRSN estime nécessaire que l'Andra étudie ainsi que conclu au chapitre 8.2.1.3 du présent rapport et ayant conduit à l'engagement E65-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017.

Aussi, l'IRSN estime que l'Andra devra, dans le dossier de DAC, évaluer les conséquences envisageables sur le milieu géologique, de séismes survenant après fermeture du stockage et justifier leur prise en compte dans l'évaluation de sûreté après fermeture. Ce point fait l'objet d'une partie de l'engagement E64-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

8.2 EVALUATION DE LA CAPACITE GLOBALE DE CONFINEMENT

Le présent chapitre porte sur l'évaluation de la capacité de confinement du stockage et de l'impact radiologique après sa fermeture réalisée par l'Andra au stade du DOS. Dans le chapitre 8.2.1, l'IRSN rappelle les hypothèses retenues par l'Andra pour définir le « domaine d'évolution normale » sur la base de la démarche d'évaluation de sûreté présentée au chapitre 6.2 du présent rapport, s'appuyant sur la connaissance des colis, la connaissance du site de MHM, notamment le modèle hydrogéologique, et l'évolution des composants du stockage, examinées aux chapitres 3, 4 et 5 du présent rapport, l'évaluation de l'impact du stockage, pour les deux scénarios d'évolution normale (SEN) constituant le domaine d'évolution normale, est examinée dans ce chapitre. Le chapitre 8.2.2 est dédié à l'analyse des scénarios d'évolution altérée (SEA) et *What-if* relatifs à des dysfonctionnements de scellements ou de conteneurs de déchets HA. L'étude de sensibilité à l'architecture du stockage transmise par l'Andra en cours d'instruction est examinée au chapitre 8.2.3. Les conclusions de l'IRSN sur la capacité de confinement du stockage sont présentées au chapitre 8.2.4. Enfin, l'IRSN a examiné les scénarios d'intrusion humaine (chapitre 8.2.5) et la prise en compte des combustibles usés et des réserves dans les évaluations d'impact du stockage pendant la période après fermeture (chapitre 8.2.6).

8.2.1 DOMAINE D'EVOLUTION NORMALE

8.2.1.1 Inventaire radiologique à terminaison

L'Andra indique que l'inventaire radiologique de référence pour les évaluations après fermeture est établi sur la base de la liste de 144 radionucléides de période supérieure à 6 mois et inférieure à 5 milliards d'années. Le Cm-242 est ajouté à cette liste en raison des radionucléides à vie longue de sa chaîne de décroissance. Pour évaluer l'impact du stockage en SEN, compte tenu des temps de transfert dans le Callovo-Oxfordien, l'Andra retient les radionucléides dont la période est au-delà de 1000 ans. **L'IRSN estime que cette approche, visant à estimer l'impact global du stockage, est pertinente.** Dans la suite du présent rapport, seuls les résultats pour les radionucléides qui combinent forte mobilité dans la géosphère et faible décroissance radioactive sont examinés, dans la mesure où ce sont les principaux contributeurs à l'impact.

Par ailleurs, la démarche de distribution dans l'architecture de l'inventaire de référence à terminaison par l'Andra vise à couvrir les incertitudes relatives aux chroniques de mise en stockage des colis de déchets sur l'ensemble de la période d'exploitation du stockage. Par exemple, l'Andra indique, pour les familles MA-VL, qu'une analyse exploratoire basée sur un scénario de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture a permis de déterminer qu'une distribution des familles basée sur leur activité en ¹²⁹I donnerait l'impact potentiel global le plus élevé. Ainsi, pour l'évaluation de sûreté après fermeture, à l'exception des colis prévus d'être stockés durant la phase pilote, l'Andra retient un mode de distribution de l'inventaire radiologique de référence dans l'architecture du stockage indépendant des chroniques de livraison [40], en considérant :

- un remplissage des alvéoles MAVL par activité décroissante en ¹²⁹I depuis l'entrée vers le fond du quartier ;

- un remplissage des sous-quartiers HA1/HA2 par activité décroissante en ¹²⁹I de l'entrée du sous-quartier vers le fond.

L'IRSN estime que la démarche de distribution de l'inventaire radiologique confère bien un caractère majorant à l'évaluation d'impact du stockage, au regard des incertitudes liées aux chroniques de mise en stockage des colis.

Enfin, au stade du DOS, le terme source radiologique retenu par l'Andra pour représenter le relâchement au cours du temps de radionucléides depuis les colis est composé à partir des inventaires radiologiques issus des familles de colis (chapitre 3 du présent rapport) et des modèles de relâchement qui leur sont associés (cf. chapitre 5.1 du présent rapport). Pour chaque colis d'une même famille, l'Andra suppose que l'inventaire radiologique, la dégradation des matrices et le début du relâchement suite à la rupture d'étanchéité du surconteneur sont identiques. A cet égard, l'IRSN rappelle que, pour la situation « de référence » du SEN, l'Andra retient une perte d'étanchéité des surconteneurs à 4 300 ans pour l'ensemble des colis HA. Comme indiqué au chapitre 5.2.2 du présent rapport, cette hypothèse n'est actuellement pas justifiée au regard de l'état des connaissances sur la corrosion et du prédimensionnement actuellement retenu. Cette hypothèse de durée d'étanchéité se révèle en outre particulièrement forte au vu du nombre important de colis HA (plus de 56 000 colis), qui rend probable une perte d'étanchéité prématurée de certains d'entre eux, comme déjà mentionné à l'issue de l'examen du Dossier 2005. L'IRSN constate néanmoins, comme en 2005, que les conséquences d'une défaillance prématurée de l'ensemble des conteneurs HA sont évaluées par l'Andra au travers de SEA et *What-if*, ce qui permet d'apprécier la faible influence de la durée d'étanchéité du conteneur HA sur l'impact du stockage après sa fermeture (cf. chapitre 8.2.2 du présent rapport).

Quoi qu'il en soit, l'IRSN considère qu'il pourrait être opportun, en raison des incertitudes résiduelles sur les conditions d'environnement et la prédominance du phénomène de corrosion généralisée (cf. chapitre 5.2.2 du présent rapport), de considérer des colis HA défectueux dans le SEN, comme soulevé par le groupe d'experts réunis par l'AIEA lors de la revue effectuée à l'automne 2016 [8], qui recommande que l'Andra justifie l'absence totale de colis HA défectueux ou de défaillance prématurée de ces colis dans son jeu d'hypothèses fondant le SEN.

8.2.1.2 Principaux paramètres du scénario d'évolution normale

Les valeurs des principaux paramètres retenues par l'Andra pour caractériser les composants du stockage, examinées dans les chapitres 4 et 5 du présent rapport dédiés respectivement à l'analyse de la connaissance du site et de l'évolution des composants du stockage, sont synthétisées dans le Tableau 27. L'IRSN relève que les valeurs de perméabilité concernant la ZFC au droit des scellements ou à l'interface noyau/argilites au droit des scellements sont déduites d'un calcul de perméabilité équivalente qui fait entrer en jeu différents composants du stockage. L'IRSN estime que ces valeurs équivalentes calculées, pour les situations « de référence » et « enveloppe » le cas échéant, tiennent bien compte des ordres de grandeur des perméabilités présentées au chapitre 4.5.4.1 du présent rapport et peuvent être considérées représentatives des propriétés hydrauliques attendues « en grand » pour ces zones au droit des scellements.

	Situation de référence					Situation enveloppe				
	Perméabilité K (m.s ⁻¹)	Coefficient de diffusion effectif De (m ² .s ⁻¹)			Porosité accessible ω _{acc} (-)	Perméabilité K (m.s ⁻¹)	Coefficient de diffusion effectif De (m ² .s ⁻¹)			Porosité accessible ω _{acc} (-)
		¹²⁹ I	³⁶ Cl	⁷⁹ Se			¹²⁹ I	³⁶ Cl	⁷⁹ Se	
Callovo-Oxfordien sain	4.10 ⁻¹⁴	3.10 ⁻¹²	5.10 ⁻¹²	5.10 ⁻¹²	0,07	Kv=2.10 ⁻¹³ Kh=3.10 ⁻¹³	6,5.10 ⁻¹²			0,05
Zone à fracturation discrète (ZFD)	N/A					UA				
						10 ⁻¹⁰	6,5.10 ⁻¹²			0,05
						USC (+ UT)				
Zone fracturée connectée (ZFC)	Galeries/ LSF (UA)/tunnels MAVL					Galeries/ LSF (UA)/tunnels MAVL				
	10 ⁻⁹	6.10 ⁻¹²	10 ⁻¹¹	5.10 ⁻¹²	0,07	10 ⁻⁹	1,3.10 ⁻¹¹			0,05
	Micro-tunnels HA					Micro-tunnels HA				
	10 ⁻⁶	6.10 ⁻¹²	10 ⁻¹¹	5.10 ⁻¹²	0,07	10 ⁻⁶	1,3.10 ⁻¹¹			0,05
	Scellements de fond (galeries + tunnels MAVL)					Scellements de fond (galeries + tunnels MAVL)				
	4,8.10 ⁻¹¹	6.10 ⁻¹²	10 ⁻¹¹	5.10 ⁻¹²	0,07	4,8.10 ⁻¹⁰	1,3.10 ⁻¹¹			0,05
Remblai de galeries	10 ⁻⁸	4,6.10 ⁻¹⁰			0,2	10 ⁻⁸	2,3.10 ⁻⁹			0,2
Béton revêtement/ soutènement/ voussoirs/ remplissage/ massif d'appui	10 ⁻⁶	4,6.10 ⁻¹⁰			0,2	10 ⁻⁶	2,3.10 ⁻⁹			0,2
Interface noyau/argilites au droit des scellements	Scellements de fond (galeries + tunnels MAVL)					Scellements de fond (galeries + tunnels MAVL)				
	5.10 ⁻¹¹	4,6.10 ⁻¹⁰			0,2	5.10 ⁻¹¹	2,3.10 ⁻⁹			0,2
	Scellement de puits et descenteries					Scellement de puits et descenteries				
	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰		5.10 ⁻¹¹	0,05	10 ⁻¹¹	2.10 ⁻⁹		0,05	
Noyau de scellement	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰		5.10 ⁻¹¹	0,05	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰		0,05	
Tête de micro-tunnel HA	10 ⁻⁶	6,9.10 ⁻¹⁰			0,3	10 ⁻⁶	2,3.10 ⁻⁹			0,3
Jeux inter-colis/vides apicaux	10 ⁻⁵	2,3.10 ⁻⁹			1	10 ⁻⁵	2,3.10 ⁻⁹			1
Colis de stockage/colis primaire	10 ⁻⁶	4,6.10 ⁻¹⁰			0,2	10 ⁻⁶	2,3.10 ⁻⁹			0,2

	Situation de référence					Situation enveloppe						
	Coefficient de partage solide/solution Kd (m ³ .kg ⁻¹)			Limite de solubilité Csat (mol.L ⁻¹)		Coefficient de partage solide/solution Kd (m ³ .kg ⁻¹)			Limite de solubilité Csat (mol.L ⁻¹)			
	¹²⁹ I	³⁶ Cl	⁷⁹ Se	¹²⁹ I	³⁶ Cl	⁷⁹ Se	¹²⁹ I	³⁶ Cl	⁷⁹ Se	¹²⁹ I	³⁶ Cl	⁷⁹ Se
Callovo-Oxfordien sain	0			infinie		2.10 ⁻³	0			infinie		10 ⁻⁷
Zone à fracturation discrète (ZFD)	N/A			N/A			0			infinie		10 ⁻⁷
Zone fracturée connectée (ZFC)	0			infinie		10 ⁻⁷	0			infinie		10 ⁻⁷
Béton de revêtement/soutènement des tunnels MAVL	10 ⁻³	2.10 ⁻²	0	infinie		1,5.10 ⁻⁴	0			infinie		5.10 ⁻³
Noyau de scellement	0			infinie		10 ⁻⁷	0			infinie		

Tableau 27 : Valeurs des principaux paramètres retenues pour la situation « de référence » et la situation « enveloppe » par l'Andra pour évaluer le scénario d'évolution normale [118]

8.2.1.3 Transferts dans les encaissants du Callovo-Oxfordien et identification des exutoires

L'Andra indique que le modèle développé en vue de quantifier la migration des radionucléides dans le système géologique multicouches depuis le stockage jusqu'aux différents exutoires est un modèle 3D comprenant « (i) les différentes unités géologiques (27) depuis le Bajocien inférieur jusqu'au Portlandien, avec leurs géométries réalistes, (ii) le stockage implanté au sein du Callovo-Oxfordien (en référence, implantation en milieu de couche ; en enveloppe, implantation à 50 m du toit [ou] du mur de la couche), et (iii) une extension latérale de 30 km x 30 km intégrant les différents exutoires potentiels ». L'Andra précise que ce modèle reprend le champ de perméabilité du modèle hydrogéologique « de référence » de 2012 analysé au chapitre 4.6.4.1.2 du présent rapport, et a été « calé » pour reproduire le champ de charges et les trajectoires hydrauliques (direction et vitesse) du modèle hydrogéologique précité. Il permet ainsi à l'Andra de simuler les transports diffusifs et convectifs de solutés dans les différentes formations depuis le stockage jusqu'aux exutoires.

Pour évaluer l'impact à long terme du stockage, l'Andra identifie deux exutoires pour l'alimentation en eau des groupes de référence¹⁰⁰, définis au chapitre 6.2.4 du présent rapport, pour le SEN :

- un forage dans les calcaires du Barrois, traité en considérant qu'il peut capter la totalité des radionucléides ayant pu transiter jusqu'au toit du Callovo-Oxfordien, puis à travers l'Oxfordien et le Kimméridgien. L'Andra précise qu'une dilution de 150 L/min, correspondant à la borne basse des débits de pompage observés dans cet aquifère, est appliquée aux flux molaires captés par ce forage ;
- un forage dans l'aquifère du Dogger, traité en supposant que la totalité des radionucléides ayant pu migrer par diffusion dans le Callovo-Oxfordien, puis jusque dans les horizons perméables du Dogger, peuvent être collectés par un pompage unique au droit de la ZFD. L'Andra indique qu'une dilution de 100 L/min, correspondant au débit estimé disponible de manière continue dans ce secteur, est appliquée aux flux molaires captés par ce forage.

Ainsi, l'IRSN note que l'Andra ne prend pas en compte d'exutoires naturels pour l'évaluation d'impact radiologique dans la ZIRA et à proximité. A cet égard, l'Andra a précisé en cours d'instruction que le choix d'un pompage dans les calcaires du Barrois, offrant une dilution moindre, a été jugé majorant par rapport à l'utilisation d'une rivière en contact avec l'eau du Barrois. L'IRSN convient que la dilution d'un panache de radionucléides atteignant le Barrois intercepté par un pompage est moindre par rapport à la dilution en rivière, mais ce choix tend à négliger certaines voies d'exposition liées à la consommation de poisson et de gibier qui devraient entrer en jeu dans l'évaluation d'impact du stockage. **A cet égard, la robustesse de la démonstration de sûreté pourrait être renforcée par la prise en compte d'un tel exutoire naturel dans l'aquifère du Barrois dans les évaluations d'impact du stockage après fermeture qui seront présentées dans le dossier de DAC.** Toutefois, en considérant les paramètres qui gouvernent cet impact sur l'homme (par exemple, régimes alimentaires, concentrations des radionucléides à l'exutoire...), l'IRSN convient que la prise en compte de ces voies d'exposition *via* un exutoire naturel de l'aquifère du Barrois ne devrait *a priori* pas conduire à l'établissement d'un scénario enveloppe.

Au stade du DOS, l'Andra n'évalue pas de scénario de pompage dans l'Oxfordien pour l'alimentation en eau au motif que les horizons producteurs de l'Oxfordien sont faiblement producteurs au droit du stockage et à profondeur

¹⁰⁰ Pour évaluer l'impact d'un stockage de déchets radioactifs dans un futur lointain, des groupes d'individus susceptibles d'être soumis aux expositions les plus élevées sont définis sur la base d'études sur les évolutions climatologiques et géologiques potentielles et également sur des études sociologiques. Dans le DOS, l'Andra définit ainsi un groupe de référence « multi-activités » lui permettant de combiner plusieurs voies d'exposition.

importante en comparaison de celles du Barrois, qui constitue une ressource plus accessible. En outre, l'Andra estime que la qualité des eaux de l'Oxfordien est moins bonne pour l'alimentation en eau que celle d'autres ressources en eau. À cet égard, l'IRSN estime que l'absence d'utilisation d'un aquifère profond du fait de la disponibilité d'un aquifère moins profond et plus producteur ne se justifie que sur le court terme. A plus long terme, il ne peut être exclu que l'aquifère du Barrois soit par exemple soumis à une pollution entraînant l'impossibilité de l'exploiter, en particulier pour l'eau de boisson. En outre, l'IRSN relève que la ZFD au niveau de l'Oxfordien présente des transmissivités plus élevées que dans le reste du secteur, permettant d'envisager une telle exploitation en eau, et la partie Nord de cette zone (vallée de la Marne) pourrait constituer un exutoire naturel des eaux de l'Oxfordien étant donné que le panache de particules en provenance de la ZIRA s'y dirige (cf. Figure 63). D'après l'Andra, cet exutoire « *n'est pas susceptible d'être atteint par les radionucléides issus du stockage au cours du premier million d'années après fermeture* » [40]. En effet, l'Andra a précisé, au cours de l'instruction, qu'elle tient compte, dans le million d'années de simulation, du temps nécessaire aux particules pour être relâchées hors du stockage et traverser le Callovo-Oxfordien (délai d'au moins 200 000 ans). Ainsi, au vu des vitesses de transfert dans l'Oxfordien dans le modèle hydrogéologique de l'Andra, sur les 800 000 années restantes, les particules ne parviennent pas jusqu'à la Marne. Pour ce qui concerne le temps d'atteinte de la ZFD par les trajectoires de particules émises dans l'Oxfordien, ainsi que présenté dans le chapitre 4.6.4.1 du présent rapport, l'IRSN considère que les incertitudes restantes sur le modèle hydrogéologique (notamment l'impact des propriétés retenues par l'Andra pour les marnes de la Série grise et pour la porosité cinématique) ne permettent pas d'exclure la possibilité de vitesses plus rapides dans cet aquifère et donc l'atteinte de la ZFD en moins d'un million d'années. Enfin, ainsi qu'indiqué au chapitre 4.6.4.2 relatif à la modélisation hydrogéologique des écoulements géoprospectifs, il apparaît difficile, au regard des incertitudes existantes sur la surrection et l'incision, de ne pas retenir qu'un exutoire de l'Oxfordien apparaîtra d'ici un million d'années, notamment dans la vallée de l'Ornain. En conséquence, l'IRSN considère que le modèle d'écoulement géoprospectif dit « *phénoménologique* » retenu par l'Andra n'apporte pas suffisamment de garanties quant au caractère enveloppe des évaluations d'impact du stockage après fermeture, notamment en négligeant la prise en compte d'un exutoire dans l'Oxfordien.

Aussi, l'IRSN estime que l'Andra devra, pour le dossier de DAC, dans le cadre des évaluations de l'impact du stockage à long terme, étudier une situation enveloppe de l'effet de l'évolution géoprospective vis à vis des écoulements dans les encaissants, plus particulièrement l'Oxfordien carbonaté. L'Andra devra notamment étudier le cas d'un exutoire dans l'Oxfordien pour le scénario d'évolution normale du stockage. Ce point fait l'objet de l'engagement E65-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

En tout état de cause, l'IRSN considère que les simulations nécessiteraient d'être poursuivies même au-delà du million d'années tant qu'il n'a pas été vérifié que l'activité résiduelle au-delà de cette durée ne conduirait pas à un impact inacceptable sur la population et l'environnement.

8.2.1.4 Enseignements des évaluations de performance et de l'impact associés au scénario d'évolution normale

8.2.1.4.1 Indicateurs

Pour évaluer la performance globale du stockage, l'Andra [118] définit des indicateurs permettant de quantifier la contribution de différents composants du stockage aux fonctions de sûreté retenues, pour les différentes voies de transfert des radionucléides et des toxiques chimiques. A titre d'exemple, l'Andra évalue, pour la fonction de sûreté « *s'opposer à la circulation d'eau* », les débits d'eau dans les ouvrages remblayés et scellés et, pour la fonction de

sûreté « *limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage* », les débits molaires des radionucléides dans les galeries et les liaisons surface-fond pour la voie de transfert par le stockage ainsi qu'au toit et au mur du Callovo-Oxfordien pour la voie de transfert par la formation hôte. Les débits molaires, présentés au chapitre 8.2.1.4.2 du présent rapport pour les situations « *de référence* » et « *enveloppe* » du domaine d'évolution normale et au chapitre 8.2.2 du présent rapport pour les scénarios *SEA* et *What-if*, sont des flux totaux de la somme des flux convectifs et des flux diffusifs qui constituent les mécanismes de transport des radionucléides par la voie eau. L'Andra s'intéresse notamment aux débits molaires maximaux normés par rapport à l'inventaire initial (*i.e.* à la date de fermeture du stockage en 2140) des radionucléides concernés et à la date d'occurrence de ces débits molaires maximaux. L'IRSN estime que les indicateurs choisis par l'Andra, qui sont les mêmes que ceux retenus dans le « Dossier 2005 », permettent bien d'apprécier la capacité d'atténuation et de retard du stockage vis-à-vis de la migration des radionucléides et de vérifier la robustesse du stockage pour ces évolutions probables (dysfonctionnement de composants, perte de fonction de sûreté).

L'Andra retient également la dose efficace engagée aux exutoires comme indicateur de protection radiologique [118]. Les résultats des calculs de dose, présentée au chapitre 8.2.1.4.3 du présent rapport, sont comparés à la valeur de référence de 0,25 mSv par an en *SEN* définie dans le Guide de l'ASN relatif au stockage géologique [3], prise comme contrainte de dose au sens de la CIPR 103.

8.2.1.4.2 Performance du stockage

S'agissant de la circulation d'eau dans le stockage à l'échelle du Callovo-Oxfordien, l'Andra estime, à partir de son modèle 3D présenté au chapitre 8.2.1.3 du présent rapport, les débits d'eau en sortie des liaisons surface-fond, pour les situations « *de référence* » et « *enveloppe* » qu'elle retient pour définir l'évolution normale du stockage, à quelques litres par an au maximum. L'Andra observe que (i) la répartition des charges hydrauliques dans les ouvrages du stockage obtenues par modélisation est quasiment identique à celles retenues au toit et au mur du Callovo-Oxfordien, (ii) la perturbation hydraulique induite par l'aquifère de l'Oxfordien à travers les ouvrages de liaison surface-fond est très faible, du fait de l'absence d'*EDZ* au niveau des scellements des liaisons surface-fond, qui isolent donc hydrauliquement le stockage des formations sus-jacentes et (iii), compte tenu de la position en amont hydraulique vis-à-vis des écoulements dans l'Oxfordien, de la zone *MAVL* par rapport aux ouvrages de liaison surface-fond, l'essentiel de l'eau drainée par les ouvrages de liaison surface-fond provient de cette zone. En comparaison, la contribution hydraulique des quartiers *HA* est très faible. Enfin, l'Andra estime que le regroupement des ouvrages de liaisons surface-fond et leur positionnement sur une zone à très faible gradient conduit à obtenir des débits d'eau identiques transitant dans ces ouvrages. **Ceci n'appelle pas de commentaire particulier de la part de l'IRSN.**

L'Andra indique que ces résultats, soulignant la faible circulation de l'eau dans les ouvrages, sont dus à la combinaison des propriétés favorables de la couche hôte du Callovo-Oxfordien (très faibles perméabilités, faibles gradients hydrauliques verticaux, faible endommagement lors de l'excavation dans sa partie supérieure) et à l'efficacité des scellements de liaison surface-fond (faible perméabilité des noyaux de scellement ; absence de court-circuit hydraulique autour des noyaux), **ce dont convient l'IRSN.**

S'agissant de la capacité d'atténuation et de retard des radionucléides, l'Andra indique que, pour les situations retenues, hormis l'¹²⁹I et le ³⁶Cl, radionucléides à vie longue mobiles et solubles, le ⁷⁹Se et l'²⁶Al, radionucléides à vie longue mobiles mais peu solubles, ainsi que le ⁴¹Ca et le ⁴⁰K, radionucléides à vie longue faiblement sorbés dans

les ouvrages cimentaires et les argilites, les flux des radionucléides sont soit totalement atténués par décroissance radioactive compte tenu de leur faible période au regard du temps de transfert au travers des différentes voies, soit retardés compte tenu des propriétés d'insolubilisation et de sorption dans les argilites. En outre, l'Andra montre que les débits molaires estimés au toit et au mur du Callovo-Oxfordien sont supérieurs d'au moins un ordre de grandeur à ceux obtenus en sortie des liaisons surface-fond. En particulier, les simulations de l'Andra sur un million d'années montrent que la quantité d' ^{129}I estimée au toit du Callovo-Oxfordien représente un peu plus de 10 % de la quantité initiale stockée d' ^{129}I pour la situation de référence et environ 55 % de la quantité initiale stockée d' ^{129}I pour la situation enveloppe. En comparaison, la quantité d' ^{129}I estimée à la sortie des liaisons surface-fond représente moins de 10^{-3} % de la quantité initiale stockée d' ^{129}I pour la situation de référence et moins de 1 % de la quantité initiale stockée d' ^{129}I pour la situation enveloppe. L'Andra déduit de ces débits molaires que la formation hôte constitue la principale voie de transfert pour tous les radionucléides pour atteindre l'Oxfordien et le Dogger.

L'Andra conclut, sur la base de ces résultats, que le transfert des radionucléides au sein des ouvrages du stockage et du Callovo-Oxfordien est principalement régi par la diffusion. L'IRSN convient de cette conclusion, mais rappelle cependant qu'elle estime que **la surcharge hydraulique dans le Callovo-Oxfordien devrait être prise en compte et que les valeurs de perméabilité et de porosité retenues par l'Andra dans la situation « enveloppe » pour caractériser le Callovo-Oxfordien sain ne couvrent pas les gammes de valeurs mesurées pour ces paramètres hydrauliques** (cf. chapitre 4.5.2 du présent rapport). A cet égard, l'IRSN observe que, sur la base de ses propres simulations présentées en Annexe T17 au présent rapport, la prise en compte de valeurs plus pénalisantes, notamment pour la perméabilité (perméabilité horizontale de 2.10^{-13} m/s et perméabilité verticale de 4.10^{-13} m/s) et pour le gradient hydraulique vertical dans le Callovo-Oxfordien (0,6 m/m), conduit à une augmentation des débits d'eau dans le Callovo-Oxfordien d'un facteur 50 environ. Cette augmentation n'est pas de nature toutefois, compte tenu des faibles vitesses mises en jeu, à modifier les conclusions de l'Andra quant à la prédominance des phénomènes de diffusion sur le transfert à travers la roche hôte. Le débit molaire maximal en ^{129}I estimé au toit du Callovo-Oxfordien est de l'ordre de 10^{-2} mol/an (à environ 100 000 ans), essentiellement dû aux flux diffusifs. Ce résultat est identique à celui présenté par l'Andra pour cet indicateur. En revanche, l'IRSN remarque que la voie de transfert par les ouvrages est impactée par la prise en compte de propriétés hydrauliques du Callovo-Oxfordien plus pénalisantes. En effet, l'alimentation en eau des ouvrages par le Callovo-Oxfordien est plus importante avec ces valeurs plus pénalisantes car celle-ci dépend des propriétés hydrauliques de la roche hôte et des gradients hydrauliques. Ainsi, les débits molaires maximaux estimés en sortie des liaisons surface-fond sont de l'ordre de 4.10^{-5} mol/an, soit environ un facteur 4 supérieur à ceux estimés par l'Andra pour la situation « enveloppe » et de plusieurs ordres de grandeur supérieurs à ceux estimés pour la situation « de référence ». L'IRSN observe néanmoins que les débits molaires estimés pour la voie par les ouvrages restent très inférieurs à ceux estimés au toit et au mur du Callovo-Oxfordien et les débits d'eau à travers les ouvrages sont faibles compte tenu de l'efficacité des scellements. **Aussi, l'IRSN estime d'une part que les propriétés de la roche et des scellements permettent de limiter les écoulements d'eau et donc les transferts convectifs des radionucléides et des toxiques chimiques jusqu'au Dogger et à l'Oxfordien, d'autre part que les conclusions de l'Andra relatives à la prépondérance de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien ne sont pas significativement remises en cause.**

L'IRSN constate que l' ^{129}I et le ^{36}Cl sont les radionucléides atteignant les limites du Callovo-Oxfordien dans les plus grandes proportions, comme dans les calculs réalisés dans le cadre du « Dossier 2005 » [13]. Pour les autres radionucléides, la proportion atteignant ces limites est très inférieure à celle de ces deux radionucléides. L'IRSN note toutefois que, si les débits molaires en ^{129}I et en ^{36}Cl sont du même ordre de grandeur que ceux estimés dans

les calculs réalisés dans le cadre du « Dossier 2005 », des radionucléides tels que ^{79}Se , ^{40}K , ^{26}Al , ^{14}C , ^{93}Mo , ^{41}Ca et les isotopes 235 et 238 de l'uranium pour la situation « enveloppe » dépassent les débits molaires estimés en 2005. L'IRSN constate que ces augmentations sont les conséquences de la mise à jour des coefficients de sorption dans le Callovo-Oxfordien pour ces radionucléides, qui désormais présentent des K_d inférieurs à $10^{-2} \text{ m}^3/\text{kg}$, voire nuls pour les anions (^{26}Al , ^{14}C et ^{93}Mo). L'IRSN estime donc que la connaissance de ce paramètre est prépondérante pour estimer la capacité de la roche à limiter l'impact radiologique du stockage. L'IRSN souligne de nouveau l'effort réalisé par l'Andra depuis 2005 pour constituer une base de données pour l'ensemble des radionucléides et réitère ses encouragements à **poursuivre ses études visant à déterminer les coefficients de rétention du Callovo-Oxfordien pour les formes chimiques des éléments relâchés identifiés au chapitre 4.5.3 du présent rapport**. A cet égard, compte tenu de sa remarque sur la spéciation du ^{79}Se au chapitre 4.5.3 du présent rapport, l'IRSN a évalué les conséquences (cf. Annexe T17) de la prise en compte de ce radionucléide sous la forme Se(VI) au moment de son relâchement hors des déchets vitrifiés et pendant la migration, faisant de ce radionucléide un élément soluble et mobile dans chacun des composants, notamment dans la roche hôte. Cette hypothèse peut être considérée comme pénalisante car le Se(VI) ne semble pas être la spéciation majoritaire dans les déchets vitrifiés, néanmoins, au regard des éléments présentés au chapitre 4.5.3 elle reste plausible pour une partie au moins de l'inventaire en ^{79}Se . Il ressort de cette évaluation que les débits molaires maximaux estimés en ^{79}Se au toit et au mur par l'IRSN ($7,9 \cdot 10^{-2} \text{ mol/an}$) sont environ un facteur 250 supérieurs à ceux évalués par l'Andra pour la situation « enveloppe » ($3 \cdot 10^{-4} \text{ mol/an}$) et environ un facteur 16 000 pour la situation « de référence » ($5 \cdot 10^{-6} \text{ mol/an}$). L'IRSN souligne ainsi que l'incertitude portant sur la forme chimique sous laquelle peut se trouver le sélénium a une influence significative sur son relâchement dans l'Oxfordien et le Dogger. **En conséquence, l'IRSN estime que l'impact radiologique dû au ^{79}Se pourrait être sous-estimé par l'Andra ; ce point est complété au chapitre 8.2.1.4.3 du présent rapport.**

Par ailleurs, l'Andra a évalué l'incidence d'un choix de scellements de moindre performance pour la fermeture des alvéoles MAVL dans le cadre d'analyses d'opportunités d'optimisation. Pour cette étude, l'Andra a retenu une perméabilité du noyau de scellement de 10^{-8} m/s (à comparer à 10^{-11} m/s en situation « de référence » et « enveloppe » du SEN, cf. Tableau 27), équivalente à celle d'un remblai composé d'argiles excavées. L'Andra indique que cette hypothèse conduit à une augmentation de l'ordre de 20 % des transferts d' ^{129}I depuis l'alvéole vers les galeries. Toutefois, compte tenu du caractère globalement diffusif des transferts dans les ouvrages du fait de l'efficacité de la fermeture au niveau des scellements de liaison surface-fond, les débits molaires en sortie des liaisons surface-fond restent très minoritaires en comparaison de ceux évalués au toit et au mur du Callovo-Oxfordien. L'IRSN convient que, lorsque la diffusion est le principal moteur des transferts de radionucléides, dans le cadre du SEN (avec des scellements de liaisons surface/fond et de galeries performants), la construction d'un scellement de haute performance hydraulique aux extrémités des alvéoles MAVL n'apparaît pas essentielle. A cet égard, l'IRSN constate avec satisfaction que l'hypothèse d'un scellement de performance de perméabilité égale à 10^{-8} m/s aux extrémités des alvéoles MAVL a également été retenue au stade du DOS par l'Andra dans la définition d'un SEA postulant le dysfonctionnement des scellements de liaisons surface/fond et de galeries (au niveau de l'interface avec les argilites et/ou du noyau argileux) afin d'en évaluer l'incidence sur les débits molaires en sortie des liaisons surface-fond et sur l'impact à long terme du stockage. L'Andra montre que dans ce cas les débits molaires sont du même ordre de grandeur que ceux postulant la présence d'un noyau argileux performant pour clore les extrémités des alvéoles MAVL. Toutefois, l'IRSN rappelle que le choix d'un scellement de moindre performance pour la fermeture des alvéoles MAVL fait reposer une plus grande part de la sûreté à long terme du stockage sur

d'autres composants ouvrages. En particulier, l'IRSN soulignait, à l'issue de l'examen du dossier « Ouvrages de fermeture » (2014) [30], que les scellements des liaisons surface-fond constituent l'élément clé pour s'opposer au transfert de radionucléides hors du stockage via les ouvrages. Or, si la démonstration de la performance de ces scellements apparaît plus accessible que celle des scellements d'alvéole MAVL, il n'en reste pas moins que celle-ci reste à fournir. A cet égard, un démonstrateur à l'échelle 1, envisagé par l'Andra après l'échéance de la DAC, ne fournira des données consolidées que plusieurs années, voire plusieurs dizaines d'années, après sa mise en place (cf. chapitre 4.5.4.1). Dans l'attente, l'IRSN considère qu'une approche donnant un poids aussi important à un unique composant dont la démonstration de la performance n'est pas encore acquise, peut être fragile. En tout état de cause, l'IRSN considère que, si l'Andra retient un scellement des extrémités des alvéoles MAVL avec des matériaux de remblayage de faible performance hydraulique au stade de la DAC de Cigéo, alors il conviendra qu'elle évalue les dispositions nécessaires pour conserver une haute capacité de confinement globale du stockage y compris en cas de défaillance des scellements de liaisons surface/fond. Ce point portant sur l'architecture globale du stockage est repris au chapitre 8.2.4 du présent rapport.

8.2.1.4.3 Evaluation d'impact radiologique

À l'instar de l'évaluation de la performance du stockage, l'Andra définit pour l'évaluation de l'impact radiologique du stockage dans le cas du SEN, une situation « *de référence* » et une situation « *enveloppe* », pour lesquelles l'Andra retient des valeurs « phénoménologiques » et/ou des valeurs « conservatives », qui traduisent son état des connaissances. L'Andra présente notamment les débits molaires estimés au moyen de la modélisation hydrogéologique en différentes localisations du milieu géologique (par exemple, toit de l'Oxfordien, toit du Kimméridgien, au niveau de la zone de fracturation diffuse (ZFD) du Dogger...), synthétisés dans le Tableau 28. Comme indiqué dans le chapitre 8.2.1.3 du présent rapport, l'Andra retient deux exutoires pour l'évaluation d'impact radiologique, à savoir l'aquifère du Barrois et la ZFD dans l'aquifère du Dogger.

Pour ce qui concerne l'exutoire du Barrois, l'IRSN constate que, pour la situation « *de référence* », l'amplitude des flux d'¹²⁹I transitant depuis le toit du Callovo-Oxfordien jusqu'au Kimméridgien est globalement atténuée d'un facteur 1 000 (passant d'environ 10⁻³ mol/an à environ 10⁻⁶ mol/an). Les flux transitant ensuite dans le Kimméridgien sont atténués d'un facteur 10 supplémentaire pour atteindre environ 10⁻⁷ mol/an. Ainsi, l'IRSN note que, dans les calculs de l'Andra, le transfert essentiellement vertical jusqu'à la surface à travers une succession d'aquifères et de couches semi-perméables peut être relativement important et note que celui-ci dépend fortement des propriétés de diffusion des milieux géologiques traversés retenues par l'Andra au stade du DOS. Pour la situation « *enveloppe* », l'IRSN note que le facteur d'atténuation n'est que d'environ un facteur 20 (passant de 6,5 10⁻³ mol/an à 2,9 10⁻⁴ mol/an).

Pour ce qui concerne l'exutoire du Dogger, l'IRSN note que les facteurs d'atténuation dans les deux situations sont équivalents (1,1-1,2) pour les flux d'¹²⁹I estimés en aval des écoulements dans cet aquifère. L'Andra évalue également l'atténuation dans l'Oxfordien en aval des écoulements et obtient un facteur d'atténuation compris entre 1,2 et 2,6 selon la situation retenue. A cet égard, l'IRSN rappelle les réserves formulées au chapitre 4.6.3 et au chapitre 8.2.1.3 sur la localisation des exutoires du système hydrogéologique et les temps de transfert associés à ces exutoires, qui peuvent donc modifier les facteurs d'atténuation estimés par l'Andra. L'IRSN observe que l'atténuation des flux est relativement faible pour un transfert de radionucléides de plusieurs kilomètres à travers

les aquifères. Néanmoins, l'IRSN estime que cet indicateur¹⁰¹ ne permet pas de statuer sur la capacité de l'Oxfordien et du Dogger à diluer les panaches de radionucléides provenant de la roche du Callovo-Oxfordien et des sorties de liaisons surface-fond du stockage. A cette fin, l'atténuation des concentrations de radionucléides (par exemple entre les concentrations estimées au mur du Callovo-Oxfordien et celles estimées à la ZFD du Dogger) paraît être un indicateur pertinent pour évaluer les capacités de dispersion des aquifères. **En particulier, l'IRSN souligne que cet indicateur mérite d'être utilisé pour l'évaluation des conséquences du SEA postulant le dysfonctionnement de scellements (cf. chapitre 8.2.2 du présent rapport) afin d'analyser dans quelle mesure les éventuels « points chauds » (concentrations notablement plus importantes en sortie des liaisons surface-fond en comparaison de celles estimées au toit du Callovo-Oxfordien pendant quelques dizaines de milliers d'années) sont dilués lors de leur transfert dans l'Oxfordien.**

¹⁰¹ L'évaluation d'un débit molaire nécessite de définir une surface à travers laquelle ce flux de radionucléides est calculé ; l'aire de cette surface est un paramètre qui entre dans le calcul de ce flux, et qui, si elle peut s'expliquer aisément pour le stockage (i.e. section de galeries, section des liaisons surface-fond, emprise du stockage...), paraît difficilement justifiable pour le transfert dans des milieux géologiques.

Localisation	Masse cumulée à 1 million d'années (mol)	[masse cumulée sortant] / [masse initiale] à 1 million d'années (%)	Débit molaire maximum (mol/an)	Date du débit molaire maximum (an)
Terme-Source	4.97E+03	100	2.21E+03	
Toit du Callovo-Oxfordien	5.43E+02	10.9	9.35E-04	8.40E+05
dont HA	3.02E+02	6.1	5.51E-04	8.52E+05
dont MAVL	2.42E+02	4.9	3.84E-04	8.13E+05
Toit de l'Oxfordien	2.77E-01	6.E-03	9.27E-07	1.00E+06
Toit du Kimméridgien	2.16E-02	4.E-04	1.32E-07	1.00E+06
Oxfordien (à 9 km en aval des écoulements)	8.99E+01	1.8	3.57E-04	1.00E+06
Mur du Callovo-Oxfordien	5.54E+02	11.1	9.50E-04	8.38E+05
dont HA	3.01E+02	6.1	5.50E-04	8.52E+05
dont MAVL	2.52E+02	5.1	4.01E-04	8.12E+05
Dogger (au niveau de la zone de fracturation diffuse, en aval des écoulements)	4.60E+02	9.3	8.57E-04	8.92E+05

Localisation	Masse cumulée à 1 million d'années (mol)	[masse cumulée sortant] / [masse initiale] à 1 million d'années (%)	Débit molaire maximum (mol/an)	Date du débit molaire maximum (an)
Terme-Source	4.97E+03	100	2.31E+03	
Toit du Callovo-Oxfordien	2.77E+03	55.7	6.52E-03	1.22E+05
dont HA	1.63E+03	32.7	4.36E-03	1.07E+05
dont MAVL	1.15E+03	23.0	2.34E-03	1.56E+05
Toit de l'Oxfordien	1.61E+02	3.2	3.52E-04	2.72E+05
Toit du Kimméridgien	1.51E+02	3.0	2.89E-04	3.84E+05
Oxfordien (à 9 km en aval des écoulements)	2.58E+03	51.8	5.26E-03	2.58E+05
Mur du Callovo-Oxfordien	1.21E+03	24.3	1.94E-03	3.20E+05
dont HA	6.08E+02	12.2	9.77E-04	3.43E+05
dont MAVL	5.99E+02	12.0	9.71E-04	2.92E+05
Dogger (au niveau de la zone de fracturation diffuse, en aval des écoulements)	9.52E+02	19.1	1.54E-03	3.50E+05

Tableau 28 - Bilan massique sur un million d'années, maximum de débit molaire en différentes localisations du milieu géologique pour le SEN (situation « de référence » en haut et situation « enveloppe » en bas)

Par ailleurs, l'Andra a évalué des facteurs de conversion pour le groupe de référence « multiactivités » aux exutoires du Barrois et du Dogger, pour les biosphères types tempérée et chaude qu'elle retient au stade du DOS ; ces facteurs de conversion sont présentés dans le Tableau 29. L'Andra déduit ainsi les doses efficaces engagées pour un individu appartenant au groupe de référence « multi-activités » sur la base des concentrations des radionucléides évaluées par sa modélisation du transfert des radionucléides jusqu'aux exutoires et des facteurs de conversion.

Biosphère type tempérée Facteurs de conversion (Sv.an ⁻¹ par Bq.L ⁻¹)*		
Radionucléide	Exutoire Barrois Adulte représentatif du groupe multi-activité avec irrigation de céréale	Exutoire Dogger Adulte représentatif du groupe multi-activité sans irrigation de céréale
¹⁴ Corga	<i>Sans objet</i>	$4,6.10^7$
²⁶ Al	<i>Sans objet</i>	$2,8.10^5$
³⁶ Cl	$1,4.10^5$	$6,1.10^7$
⁴⁰ K	<i>Sans objet</i>	$8,3.10^6$
⁴¹ Ca	<i>Sans objet</i>	$1,6.10^7$
⁷⁹ Se	$7,7.10^5$	$5,5.10^5$
⁹³ Mo	<i>Sans objet</i>	$3,4.10^6$
¹²⁹ I	$6,8.10^5$	$6,8.10^5$

*pour une contamination constante de 10 000 ans

Biosphère chaude subtropicale humide Facteurs de conversion (Sv.an ⁻¹ par Bq.L ⁻¹)*		
Radionucléide	Exutoire Barrois Adulte représentatif du groupe multi-activité avec irrigation de céréale	Exutoire Dogger Adulte représentatif du groupe multi-activité sans irrigation de céréale
¹⁴ Corga		6.10^7
²⁶ Al		$2,8.10^5$
³⁶ Cl	$1,6.10^5$	$6,4.10^7$
⁴⁰ K		$7,2.10^6$
⁴¹ Ca		$1,6.10^7$
⁷⁹ Se	$7,7.10^5$	$5,5.10^5$
⁹³ Mo		$3,4.10^6$
¹²⁹ I	$6,8.10^5$	$6,8.10^5$

*pour une contamination constante de 10 000 ans

Tableau 29 - Facteurs de conversion (Sv.an⁻¹ par Bq.L⁻¹) appliqués par l'Andra pour les groupes de référence « multi-activités » aux exutoires du Barrois et du Dogger, pour les biosphères chaude et tempérée.

L'Andra retient de ses évaluations que, pour la situation « *de référence* », le cumul des doses engendrées par les trois radionucléides atteignant l'exutoire du Barrois (¹²⁹I, ³⁶Cl et ⁷⁹Se) est inférieur à 10⁻⁶ mSv/an quelle que soit la biosphère étudiée. L'Andra indique que, pour les radionucléides qui parviennent dans la ZFD du Dogger (¹²⁹I, ³⁶Cl, ²⁶Al et ⁷⁹Se), le cumul des doses résultantes atteint au maximum 0,001 mSv/ an (cf. Tableau 30).

Pour la situation « *enveloppe* », l'Andra indique que, pour l'exutoire au Barrois, l'impact radiologique maximal est légèrement inférieur à 0,002 mSv/an pour la biosphère tempérée et la biosphère chaude (cf. Tableau 30). Les doses maximales évaluées pour un pompage au Dogger sont inférieures à 0,02 mSv/an pour ces deux biosphères. L'Andra en déduit que l'impact du stockage en SEN est inférieur, d'au moins un ordre de grandeur, à la valeur de référence de 0,25 mSv/an retenue dans le Guide de l'ASN relatif au stockage géologique [3].

		Biosphère tempérée		Biosphère chaude	
		Dose maximale (mSv/an)	Date de dose maximale (milliers d'années)	Dose maximale (mSv/an)	Date de dose maximale (milliers d'années)
Situation de référence	Pompage au Barrois 150 L.min ⁻¹	4,2.10 ⁻⁰⁷	≥1000	4,8.10 ⁻⁰⁷	≥1000
	Pompage au Dogger (zone de fracturation diffuse) 100 L.min ⁻¹	1,0.10 ⁻⁰⁵	800	1,1.10 ⁻⁰⁵	≥1000
Situation enveloppe	Pompage au Barrois 150 L.min ⁻¹ Stockage implanté avec une garde supérieure de 50 m	1,6.10 ⁻⁰⁵	340	1,9.10 ⁻⁰⁵	340
	Pompage au Dogger (zone de fracturation diffuse) 100 L.min ⁻¹ Stockage implanté avec une garde inférieure de 50 m	1,3.10 ⁻⁰²	210	1,8.10 ⁻⁰²	250

Tableau 30 - Doses maximales estimées par l'Andra aux exutoires du Barrois et du Dogger pour les biosphères chaude et tempérée.

L'IRSN relève, quelle que soit la biosphère retenue, que le nombre de radionucléides atteignant les exutoires dans les modélisations de l'Andra, notamment l'exutoire du Dogger, est plus important (¹²⁹I, ³⁶Cl, ²⁶Al, ⁷⁹Se, ⁴¹Ca, ⁴⁰K, ⁹³Mo et ¹⁴C) que dans le « Dossier 2005 », même si les contributeurs principaux à la dose restent l'¹²⁹I, le ³⁶Cl et le ⁷⁹Se. A cet égard, l'IRSN constate que le ⁷⁹Se est le radionucléide contribuant majoritairement à la dose efficace pour l'exutoire du Dogger en situation « enveloppe ». L'IRSN observe que l'augmentation de la contribution de la dose du ⁷⁹Se est essentiellement due à l'actualisation de la période du ⁷⁹Se (65 000 ans en 2005 et 377 000 ans au stade du DOS), ce qui conduit d'une part à augmenter la quantité de ⁷⁹Se en moles dans l'inventaire (40 000 moles au stade du DOS au lieu d'environ 6 500 moles en 2005 (cf. chapitre 3.2.2 du présent rapport)), d'autre part à réduire l'effet de la décroissance radioactive. Ainsi, pour la situation « de référence » du SEN, l'Andra indique que la dose maximale due au ⁷⁹Se à l'exutoire du Dogger est de l'ordre de 10⁻⁵ mSv/an. Pour la situation « enveloppe » du SEN à l'exutoire du Dogger, cette dose maximale est de l'ordre de 10⁻² mSv/an. Or, compte tenu des remarques formulées au chapitre 8.2.1.4.1, l'IRSN constate que, sur la base des évaluations de l'Andra et en considérant que le sélénium se trouve exclusivement sous la forme Se(VI) (i.e. la forme la plus mobile et soluble, cf. chapitres 4.5.3 et 8.2.1.4.2), la dose reçue par le groupe de référence « multiactivités », tous paramètres égaux par ailleurs, pourrait être de l'ordre de 10⁻¹ mSv/an pour la situation « de référence » et de l'ordre de 1 mSv/an pour la situation « enveloppe » du SEN à l'exutoire du Dogger. L'IRSN estime donc que l'impact radiologique maximal dû au sélénium pourrait être de l'ordre de grandeur de la contrainte de dose (0,25 mSv [3]). Dans ces conditions, l'IRSN estime que le comportement chimique du ⁷⁹Se doit être précisé pour mieux apprécier l'impact radiologique de Cigéo. En tout état de cause, comme indiqué au chapitre 4.5.3 et en l'état des connaissances sur sa spéciation, une partie au moins du sélénium devrait être, de façon pénalisante, considérée comme un élément mobile et soluble.

Aussi, l'IRSN estime que l'Andra devra évaluer, dans le dossier de DAC, l'impact radiologique du stockage à long terme en considérant la possibilité pour tout ou partie du ⁷⁹Se, suivant le type de déchets, d'être sous sa forme Se(VI), soluble et mobile, à l'instar du ³⁶Cl et de l'¹²⁹I, et justifier les choix retenus *in fine*. Ce point fait l'objet de l'engagement E66-2017 de la lettre Andra DG/17-0097 du 25 avril 2017, rappelée en Annexe A3 du présent rapport.

Enfin, comme indiqué au chapitre 7.4.2 du présent rapport, l'IRSN rappelle qu'au stade du DOS, l'Andra n'évalue ni l'impact à long terme des toxiques chimiques sur l'homme, ni l'impact du stockage sur l'environnement. L'Andra a indiqué que ces évaluations seront présentées dans le dossier accompagnant la DAC. En tout état de cause, la

demande de l'ASN 2014 D23 [1], incluant une première estimation de l'impact radiologique de l'installation sur l'environnement, ne peut être considérée comme soldée.

8.2.2 SCENARIOS D'EVOLUTION ALTEREE ET WHAT-IF

L'Andra déduit de la démarche de sélection qu'elle met en œuvre pour identifier les causes de dysfonctionnement pouvant entraîner la perte d'une des fonctions de sûreté ou une dégradation significative de la performance du stockage, une liste de scénarios examinés au chapitre 6.2 pour lesquels elle prévoit d'évaluer l'impact du stockage au stade de la [DAC](#). Les résultats des évaluations, portant sur le dysfonctionnement des scellements ou des conteneurs [HA](#), présentés par l'Andra au stade du [DOS](#), sont examinés par l'IRSN dans le présent chapitre.

Scénario [SEA](#) et [What-if](#) de dysfonctionnement des scellements

Les scénarios de dysfonctionnement des scellements supposent que les perméabilités des zones endommagées par l'excavation, de l'interface argilites/noyau argileux (composée de bentonite et de béton) et/ou du noyau argileux peuvent être de plusieurs ordres de grandeur plus élevées que celles retenues dans le [SEN](#) (cf. chapitre 8.2.1.1). Le Tableau 31 présente les perméabilités retenues pour chacun des scénarios suivants :

- [SEA-1](#) : défaillance des scellements des liaisons surface-fond par l'interface entre le noyau argileux et les argilites ;
- [SEA-2](#) : défaillance des scellements des galeries par l'interface entre le noyau argileux et les argilites ;
- [SEA-3](#) : défaillance de tous les scellements de l'installation souterraine par l'interface entre le noyau argileux et les argilites ;
- [What-if-1](#) : défaillance des scellements des liaisons surface-fond par le noyau argileux et par l'interface entre le noyau argileux et les argilites ;
- [What-if-2](#) : défaillance des scellements des galeries par le noyau argileux et par l'interface entre le noyau argileux et les argilites ;
- [What-if-3](#) : défaillance de tous les scellements de l'installation souterraine par le noyau argileux et par l'interface entre le noyau argileux et les argilites.

	Zone à fracturation discrète			Zone fracturée connectée			Interface noyau/argilites		Noyau argileux	
	Galerias/LSF(UA)/tunnels MA-VL	OF des galeries	OF des LSF	Galerias/LSF(UA)/tunnels MA-VL	OF des galeries	OF des LSF	OF des galeries	OF des LSF	OF des galeries	OF des LSF
SEN	-	-	-	10 ⁻⁹	4,8.10 ⁻¹¹	-	5.10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹
SEA-1	-	-	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁹	4,8.10 ⁻¹¹	10 ⁻⁸	5.10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹
SEA-2	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁸	-	5.10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹
SEA-3	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁸	10 ⁻⁸	5.10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹
What-if-1	-	-	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁹	4,8.10 ⁻¹¹	-	5.10 ⁻¹¹	10 ⁻⁶	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁸
What-if-2	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷	-	4,8.10 ⁻⁸	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁸	10 ⁻¹¹
What-if-3	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷	-	4,8.10 ⁻⁸	10 ⁻⁶	10 ⁻⁸	10 ⁻⁸

OF : abréviation de « ouvrages de fermeture »

	Zone à fracturation discrète			Zone fracturée connectée			Interface noyau/argilites		Noyau argileux	
	Galerias/LSF(UA)/tunnels MA-VL	OF des galeries	OF des LSF	Galerias/LSF(UA)/tunnels MA-VL	OF des galeries	OF des LSF	OF des galeries	OF des LSF	OF des galeries	OF des LSF
SEN	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁸	4,8.10 ⁻¹⁰	-	5.10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹
SEA-1	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁸	4,8.10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁸	5.10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹
SEA-2	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁸	-	5.10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹
SEA-3	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁸	10 ⁻⁸	5.10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹
What-if-1	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁸	4,8.10 ⁻¹⁰	-	5.10 ⁻¹¹	10 ⁻⁶	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁸
What-if-2	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷	-	4,8.10 ⁻⁸	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁸	10 ⁻¹¹
What-if-3	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷	-	4,8.10 ⁻⁸	10 ⁻⁶	10 ⁻⁸	10 ⁻⁸

OF : abréviation de « ouvrages de fermeture »

Tableau 31 - Valeurs de perméabilités retenues pour chaque scénario et configuration de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture (situation « de référence » en haut et situation « enveloppe » en bas)

L'IRSN constate que la défaillance de l'interface entre le noyau argileux et les argilites se traduit dans les modélisations de l'Andra essentiellement par la prise en compte d'une zone fracturée connectée (ZFC) autour des scellements de performance hydraulique équivalente à celle des galeries remblayées (perméabilité de 10⁻⁹ m/s pour la situation « de référence », perméabilité de 10⁻⁸ m/s pour la situation « enveloppe »). En termes de performance hydraulique du stockage, l'IRSN relève que la prise en compte d'une ZFC autour des scellements, telle que postulée par l'Andra dans les scénarios SEA [119], peut conduire à une augmentation des débits d'eau en sortie des liaisons surface-fond d'un facteur 100 (jusqu'à quelques m³/an). Pour une défaillance de cette influence et du noyau argileux des scellements (scénarios What-if), l'IRSN constate que cette augmentation n'est guère plus importante (moins d'une dizaine de m³/an).

Pour ce qui concerne le transfert des radionucléides, l'Andra compare les résultats des scénarios SEA et What-if et ceux des scénarios d'évolution normale et montre que d'une part les débits molaires évalués en sortie des liaisons surface-fond sont supérieurs de 3 à 5 ordres de grandeur à ceux estimés pour le SEN, d'autre part que les débits molaires évalués au toit du Callovo-Oxfordien sont tous équivalents (cf. Figure 79 et Figure 80). En outre, l'Andra présente les proportions d'¹²⁹I sortant par le toit du Callovo-Oxfordien et par les liaisons surface-fond par rapport à l'inventaire initialement présent dans les colis. Il en ressort que la proportion d'¹²⁹I sortant par les liaisons surface-fond peut atteindre les 10 à 20 % de l'inventaire stocké pour les scénarios What-if les plus pénalisants (inférieure à 1 % dans le SEN). Or, la proportion d'¹²⁹I transitant par la roche pour atteindre le toit est comprise entre 43 et 50 % pour ces mêmes scénarios. L'Andra estime donc que la roche hôte reste, dans ces conditions, la voie de transfert privilégiée pour les radionucléides.

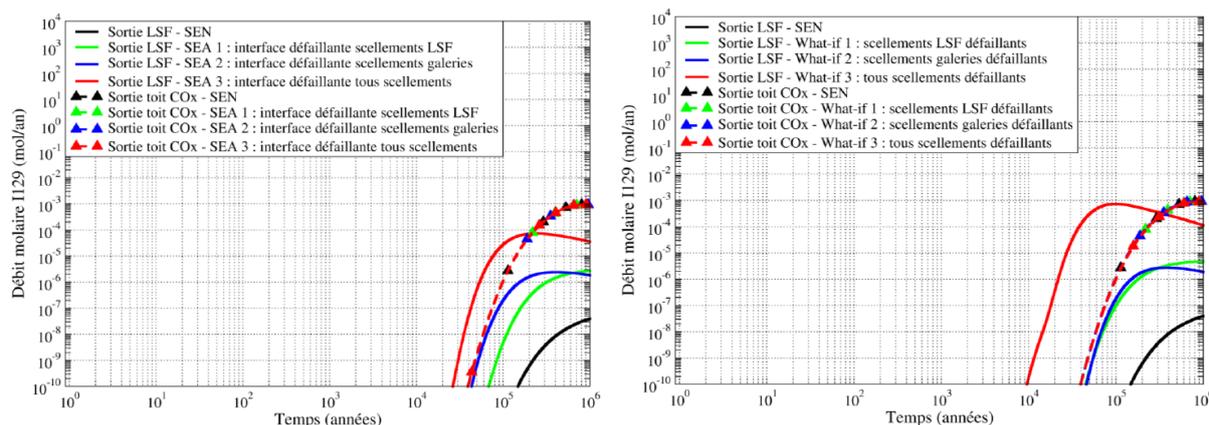


Figure 79 : Débits molaires au cours du temps au toit du Callovo-Oxfordien et en sortie des liaisons surface-fond pour l' ^{129}I pour les SEA de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture (à gauche) et les scénarios *What-if* de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture (à droite) (les valeurs de paramètres retenues pour caractériser les autres composants du stockage sont celles de la situation « de référence » du SEN)

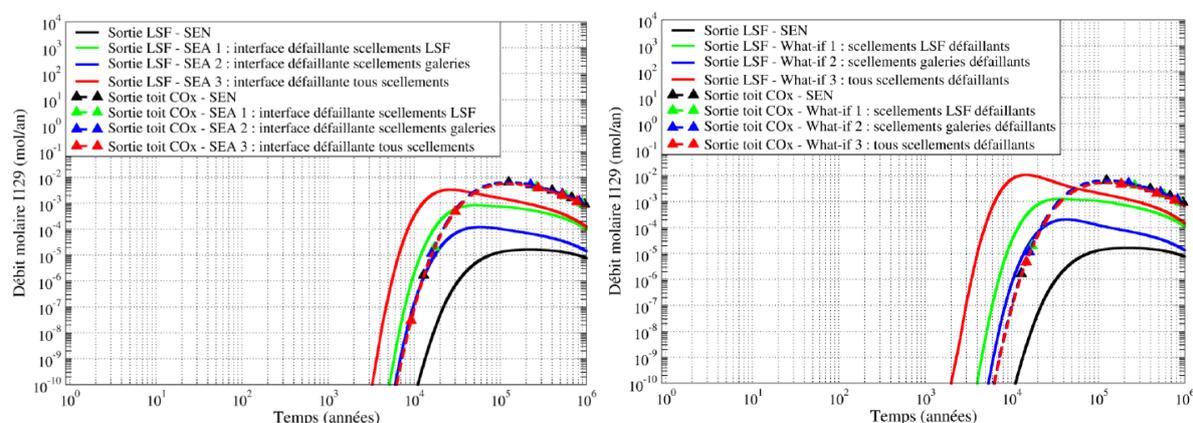


Figure 80 : Débits molaires au cours du temps au toit du Callovo-Oxfordien et en sortie des liaisons surface-fond pour l' ^{129}I pour les SEA de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture (à gauche) et les scénarios *What-if* de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture (à droite) (les valeurs de paramètres retenues pour caractériser les autres composants du stockage sont celles de la situation « enveloppe » du SEN)

De l'examen des éléments présentés par l'Andra au stade du DOS, l'IRSN retient les points suivants.

Au stade du DOS, l'Andra retient des propriétés hydrauliques pour les scellements de galerie relativement proches de celles des scellements des liaisons surface-fond (cf. Tableau 27), même si ces derniers présentent des perméabilités plus faibles. En effet, l'Andra retient une perméabilité des scellements de galeries de 5.10^{-11} m/s et une perméabilité des scellements des liaisons surface-fond de 10^{-11} m/s (cf. chapitre 4.5.4). A titre de comparaison, l'IRSN rappelle que, dans le dossier « Ouvrages de fermeture », l'Andra retenait une perméabilité « en grand » équivalente à 10^{-9} m/s pour les scellements de galeries, alors que la perméabilité des scellements des liaisons surface-fond était retenue à 10^{-11} m/s. Au stade du DOS, l'influence de ces composants est évaluée par l'Andra au travers des scénarios SEA-1 et SEA-2, *What-if* 1 et *What-if* 2, postulant le dysfonctionnement de l'un des deux types de scellements. A cet égard, quels que soient les scénarios considérés, les scellements des liaisons surface-fond et les scellements des galeries sont d'efficacités identiques dans la situation « de référence ». En effet, on observe que sur la Figure 79, les courbes « sortie LSF SEA-1 » (verte) et « SEA-2 » (bleue) montrent des débits molaires estimés en sortie des liaisons surface-fond sensiblement équivalents (de l'ordre de 10^6 mol/an). Pour la situation « enveloppe », la défaillance des scellements des liaisons surface-fond (*What-if* 1) a des conséquences supérieures d'environ un ordre de grandeur, en termes de débits molaires, que la défaillance des scellements des galeries (*What-if* 2, cf. Figure 80). L'IRSN relève toutefois que cet ordre de grandeur s'explique par la prise en compte dans

le scénario *What-if* 1 d'une perméabilité de l'interface noyau/argilites équivalente à celle d'un béton dégradé (10^{-6} m/s, cf. Tableau 31) qui joue ainsi le rôle de court-circuit du noyau argileux des scellements de liaison surface-fond dont la perméabilité est de 10^{-8} m/s. En revanche, dans le scénario *What-if* 2, où la perméabilité de l'interface noyau/argilites est retenue à $4,8 \cdot 10^{-8}$ m/s (pour une perméabilité de 10^{-8} m/s également), le court-circuit est moins efficace. L'IRSN s'interroge sur la représentativité et le caractère conservatif de cette paramétrisation de l'interface ($4,8 \cdot 10^{-8}$ m/s), compte tenu de l'hypothèse d'un noyau argileux défaillant. Néanmoins, l'IRSN estime, sur la base des débits molaires estimés par l'Andra au stade du DOS, que les scellements des galeries apportent une réelle redondance aux scellements des liaisons surface-fond.

L'IRSN remarque, pour les scénarios postulant des défaillances de tous les scellements de l'installation souterraine, que les débits molaires maximaux en ^{129}I à la sortie des liaisons surface-fond sont du même ordre de grandeur que ceux estimés au toit du Callovo-Oxfordien, voire supérieurs pour les conditions les plus pénalisantes retenues par l'Andra (cf. Figure 81 droite). En outre, l'IRSN constate que la date d'occurrence de ces débits maximaux est beaucoup plus précoce (quelques centaines de milliers d'années avant) que ceux estimés au toit du Callovo-Oxfordien. Pour les conditions hydrauliques les plus pénalisantes retenues par l'Andra, l'IRSN relève que les débits molaires maximaux sont enregistrés entre 10 000 et 20 000 ans après la fermeture de l'installation. Par ailleurs, l'IRSN remarque que les débits molaires estimés en sortie des liaisons surface-fond augmentent au plus d'un ordre de grandeur entre les scénarios SEA et *What-if*. En effet, on observe, sur la Figure 80, que pour les SEA-3 et *What-if*-3, les débits en sortie de liaisons surface-fond (courbes rouge) atteignent un niveau équivalent à ceux estimés au toit du Callovo-Oxfordien. Un transfert important de solutés vers les liaisons surface-fond par les ouvrages est donc possible à partir du moment où le noyau argileux, performant ou non en termes de perméabilité, est court-circuité. Selon l'IRSN, ces résultats traduisent ainsi la prédominance de la convection pour le transfert des radionucléides dans les ouvrages du stockage dans le cas où les scellements ne remplissent pas ou peu leur rôle.

En tout état de cause, l'IRSN note que, pour tous les scénarios où une défaillance des scellements (SEA ou *What-if*) est postulée, environ 50 % de l'activité en ^{129}I initialement contenue dans les déchets transite vers le toit du Callovo-Oxfordien au cours du premier million d'années. En comparaison, 20 % de l'activité en ^{129}I initialement contenue dans les déchets transite par les ouvrages dans le cas le plus pénalisant des scénarios *What-if* (scénario *What-if*-3) dans le même intervalle. Le Callovo-Oxfordien constitue donc, pour les situations de défaillance des scellements, la voie de transfert principale pour l' ^{129}I et plus généralement pour les radionucléides mobiles (^{36}Cl , ^{79}Se , ^{41}Ca ...).

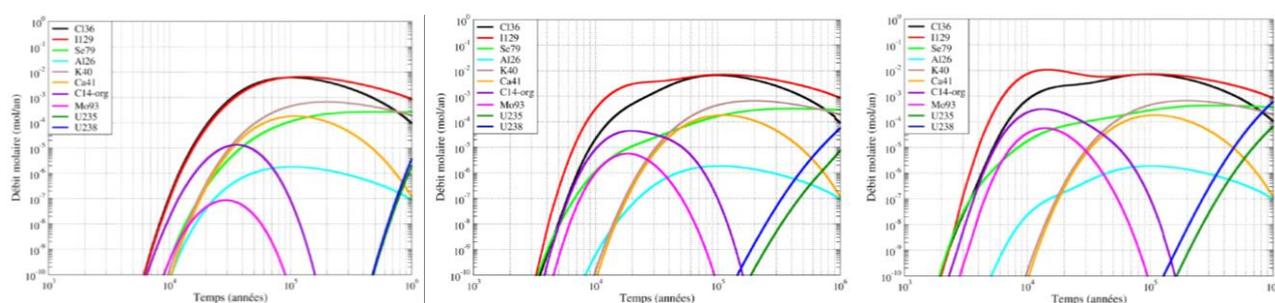


Figure 81 : Débits molaires au cours du temps au toit et au mur du Callovo-Oxfordien en situation « *enveloppe* » (de gauche à droite : SEN, SEA de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture (tous scellements défaillants), Scénario *What-if* de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture (tous scellements défaillants))

A cet égard, pour vérifier la prédominance de cette voie de transfert, l'IRSN a évalué l'impact de la prise en compte dans le Callovo-Oxfordien de la surcharge hydraulique (0,6 m/m) et des valeurs de perméabilité verticale de

2.10^{-13} m/s et de perméabilité horizontale de 4.10^{-13} m/s (cf. chapitre 4.5.2 du présent rapport). L'IRSN déduit de ses évaluations (cf. Annexe T17), que les débits d'eau estimés en sortie de liaisons surface-fond sont 25 fois supérieurs ($55 \text{ m}^3/\text{an}$) à ceux estimés par l'Andra dans les scénarios *What-if* les plus pénalisants, et que, pour le puits le plus proche de la zone MAVL (placé à environ 300 m des premiers alvéoles), les pics de débits molaires en ^{129}I apparaissent en quelques milliers d'années. Si les écoulements apparaissent effectivement plus rapides dans les calculs de l'IRSN, les débits molaires maximaux en ^{129}I restent néanmoins équivalents à ceux évalués par l'Andra (de l'ordre de 10^{-2} mol/an sur les premières dizaines de milliers d'année) ; l'IRSN explique, à ce stade, ce résultat peu intuitif par un inventaire radiologique mobilisé par cette voie de transfert relativement constant qui dépend du positionnement des alvéoles par rapport aux puits. **L'IRSN convient donc que, en condition de dysfonctionnement des scellements, la voie par la roche hôte reste la voie prédominante.** Néanmoins, la proportion de radionucléides transférés vers l'Oxfordien par les ouvrages peut être importante (30 % de l'inventaire radiologique pour l' ^{129}I , 17 % pour le ^{36}Cl et 14 % pour le ^{79}Se , cf. Annexe T17). **Ainsi, l'IRSN estime que la voie de transfert par les ouvrages reste significative dans l'évaluation de l'impact du stockage, notamment si l'on tient compte d'un exutoire dans l'Oxfordien (cf. chapitre 8.2.1.3).**

De plus, l'IRSN note, sur la base des calculs de l'Andra, que les débits molaires estimés en sortie de liaisons surface-fond, pour le ^{14}C et le ^{93}Mo , sont supérieurs de plusieurs ordres de grandeur à ceux estimés au toit du Callovo-Oxfordien. En effet, les temps de transfert par les ouvrages étant largement inférieurs à ceux par la roche hôte (cf. Figure 81), l'atténuation offerte par la décroissance radioactive est moindre. Sur la base de ses propres estimations, l'IRSN observe de surcroît que les débits molaires en ^{14}C peuvent atteindre des valeurs de l'ordre de 2.10^{-2} mol/an (cf. Annexe T17 au présent rapport). **L'IRSN estime que, compte tenu des temps de transfert de quelques milliers d'années dans les galeries, la voie par les ouvrages est la voie de transfert privilégiée vers l'Oxfordien pour des radionucléides mobiles de période plus courte (^{14}C et ^{93}Mo).**

S'agissant de l'impact du stockage, les doses estimées à l'exutoire du Dogger par l'Andra sont du même ordre de grandeur que celles estimées pour le SEN (environ $0,02 \text{ mSv}/\text{an}$ pour la situation « *enveloppe* »). Les principaux contributeurs à ces doses restent le ^{79}Se , ^{129}I et ^{36}Cl . Les temps de transfert jusqu'aux exutoires retenus par l'Andra (quelques centaines de milliers d'années) permettent d'atténuer les flux des radionucléides tels que le ^{14}C et le ^{93}Mo , **ce dont convient l'IRSN.**

Cependant, l'IRSN rappelle que, comme indiqué au chapitre 8.2.1, l'Andra ne retient pas d'exutoire dans l'Oxfordien et ne présente pas, au stade du DOS, d'évaluation d'impact dosimétrique pour un groupe de référence puisant de l'eau dans l'Oxfordien. Sur la base de ses propres évaluations, l'IRSN estime que plusieurs exutoires sont possibles et atteignables par les radionucléides en quelques dizaines de milliers d'années après leur relâchement depuis le toit du Callovo-Oxfordien ou en sortie des liaisons surface-fond (cf. chapitre 4.6.4.2). Ces temps de transfert dans l'Oxfordien seraient néanmoins suffisants pour atténuer les débits molaires du ^{14}C par décroissance et considérer la contribution de ce radionucléide comme négligeable. En revanche, dans le cas hypothétique d'un pompage au droit du stockage dans le panache de ^{14}C , l'IRSN indique que, sur la base des débits molaires estimés en sortie des liaisons surface-fond par ses propres calculs et des facteurs de conversion présentés au Tableau 29, la contribution du ^{14}C à la dose atteindrait quelques dixièmes de mSv/an , soit une valeur équivalente à la contrainte de dose ($0,25 \text{ mSv}/\text{an}$) préconisée par le Guide de l'ASN relatif au stockage géologique [3]. **Ceci confirme la nécessité de limiter le transfert des radionucléides par les ouvrages, notamment comme le propose l'Andra en limitant la circulation d'eau dans les galeries par des scellements.**

Scénario SEA et What-if de défaillance des conteneurs HA

L'Andra évalue l'influence de la défaillance précoce des conteneurs HA0 et HA sur l'impact du stockage. L'Andra estime que cette défaillance a pour conséquence d'accélérer le relâchement des radionucléides. Pour cela, l'Andra estime que l'ensemble de l'inventaire radiologique et chimique est relâché instantanément de ces colis dès la fermeture du stockage. Cette hypothèse est à comparer à celles retenues par l'Andra pour le SEN, à savoir que les relâchements par les colis débutent 4 300 ans après la fermeture du stockage et durent environ 300 000 ans pour la situation « *de référence* », ou encore que les relâchements depuis les colis débutent 500 ans après la fermeture du stockage et durent environ 10 000 ans pour la situation « *enveloppe* ». Ainsi, le relâchement prématuré des radionucléides s'effectue alors que la charge thermique des colis HA n'a pas été encore totalement évacuée par la roche. Or, la diffusion des radionucléides dans les composants du stockage dépend fortement de la température. Aussi, afin de tenir compte de ce transitoire thermique, l'Andra applique un facteur multiplicatif aux coefficients de diffusion des radionucléides retenus dans les évaluations d'impact. L'Andra indique que ce facteur multiplicatif peut atteindre 2,8 à proximité des alvéoles HA 600 ans après la fermeture du stockage, mais que la phase transitoire thermique est limitée aux premières dizaines de milliers d'années de stockage, affectant peu le transfert des radionucléides compte tenu des temps de transfert à travers le Callovo-Oxfordien (d'environ 200 000 à 800 000 ans selon les situations). L'Andra indique par ailleurs que les autres effets de la température sur le transfert et la rétention (thermo-convection, viscosité, surpression interstitielle...) sont négligeables. L'IRSN convient que le poids de la durée et de l'extension de la perturbation des propriétés de la roche hôte due à l'augmentation de température autour des quartiers de colis HA est relativement faible en comparaison de celui des temps de transfert des radionucléides et de l'épaisseur de garde de roche saine dans le transfert des radionucléides hors du stockage. S'agissant de la performance du stockage, l'IRSN note que les débits molaires maximaux estimés par l'Andra au toit du Callovo-Oxfordien, quelle que soit la voie de transfert, sont similaires à ceux évalués dans le SEN. Aussi, l'IRSN convient que la défaillance précoce des conteneurs HA a peu de conséquences sur l'impact du stockage, dès lors que les autres composants du stockage, notamment la roche hôte et les scellements de liaison surface-fond, participent efficacement à leurs fonctions de sûreté.

8.2.3 ETUDE DE SENSIBILITE A L'ARCHITECTURE DU STOCKAGE

Il convient de rappeler que l'ASN a souligné à l'issue de l'instruction du dossier « Ouvrages de fermeture » que l'architecture générale du stockage (longueur des galeries, positionnement des liaisons surface-fond...) pourrait apporter des marges supplémentaires en cas de défaillance d'une ou plusieurs barrières ouvragées et a demandé à l'Andra de justifier dans le DOS l'architecture qu'elle retient en présentant les avantages et inconvénients, du point de vue de la sûreté et de la radioprotection, de différentes options pour les différentes phases (exploitation et après fermeture) du stockage (demande 2014 D2 [1] ; cf. chapitre 6.2.2).

L'Andra a présenté une liste d'« opportunités d'optimisation et variantes techniques » [40] par rapport aux options techniques retenues au stade de l'APS [123]. Parmi ces pistes d'optimisation, certaines portent sur : le stockage direct de colis de déchets MAVL, les ouvrages de fermeture dans le quartier MAVL (cf. chapitre 8.2.1.4.2 du présent rapport), la prise en compte d'alvéoles MAVL de plus grande section, la prise en compte d'alvéoles HA1/HA2 de longueur de 150 m (au lieu de 100 m en référence), la diminution du linéaire de galeries dans les quartiers HA1/HA2, la mise en place de colis MAVL vitrifiés en intercalaire des colis HA1/HA2.

Au cours de l'instruction, l'Andra a transmis [123] une étude de sensibilité de la performance globale du stockage à ces pistes d'optimisation, en vue de vérifier les enseignements tirés des évaluations du SEN et des scénarios postulant un dysfonctionnement des scellements au regard du fonctionnement du stockage et de l'importance de ces composants sont toujours valables. L'Andra y présente différents cas de calcul dont les principales hypothèses testées concernent, (i) la distance entre les quartiers de stockage et la ZSL, (ii) la longueur et le diamètre des alvéoles de stockage, et (iii) le nombre, le positionnement et les propriétés hydrauliques des ouvrages de fermeture. Pour cette étude, l'Andra retient les valeurs de paramètres définies pour la situation « *de référence* » du SEN.

En premier lieu, l'Andra conclut, de son étude mono-paramétrique, que certaines pistes d'optimisation retenues, soit portant sur les alvéoles de stockage (allongement des alvéoles HA et réduction de leur nombre, augmentation du diamètre des MAVL et diminution de leur longueur), soit portant sur l'ajout d'une liaison surface-fond, ou soit portant sur la diminution des diamètres de galerie, ont peu d'influence sur le comportement hydraulique du stockage et sur le transfert des radionucléides à long terme, **ce dont convient l'IRSN**. En deuxième lieu, l'étude de sensibilité souligne le rôle essentiel joué par les scellements, confortant ainsi les évaluations présentées dans le DOS [40].

Parmi les grands principes architecturaux qui mettent à profit les caractéristiques hydrauliques du Callovo-Oxfordien (caractère borgne des quartiers HA et MAVL, regroupement des puits, épaisseur de roche saine de plus de 50 m pour les gardes supérieure et inférieure), seules des pistes d'optimisation concernant les ouvrages de fermeture (scellements, remblais) sont évaluées dans cette étude de sensibilité, comme dans le dossier « Ouvrages de fermeture » en 2014. L'Andra estime que les scellements des liaisons surface-fond permettent de limiter efficacement la circulation de l'eau dans les ouvrages et atténuer les débits molaires en sortie des liaisons surface-fond. L'Andra ajoute que les scellements de galeries, qui présentent certes des performances hydrauliques inférieures, apportent néanmoins une redondance en contribuant à retarder la migration des radionucléides dans les ouvrages.

En cas de dysfonctionnement de tous les scellements (cf. chapitre 8.2.2), l'Andra rappelle que le transfert convectif est piloté à la fois par les gradients de charge, la perméabilité du Callovo-Oxfordien (retenue à 4.10^{-14} m/s en situation « *de référence* » et 10^{-13} m/s en situation « *enveloppe* ») et la perméabilité du revêtement/soutènement (10^{-6} m/s en toutes situations). L'Andra indique [123] que la prise en compte de longueurs de galeries de liaison plus importantes pour répondre à la demande ASN 2014 D2 précitée permet une atténuation du débit molaire d'¹²⁹I en sortie des liaisons surface-fond de l'ordre de 30 % par longueur de 100 m supplémentaire. L'Andra en déduit que, concernant la compensation que pourrait offrir le linéaire de galeries vis-à-vis des scellements de galeries défaillants, il faudrait plus de 1 000 à 2 000 m de galeries supplémentaires pour disposer d'une performance similaire à celle apportée par ces scellements. L'Andra conclut ainsi que le débit molaire en sortie des ouvrages des liaisons surface-fond est donc très peu sensible à la longueur des galeries et que l'augmentation des longueurs de galerie ne permet pas d'atténuer de manière significative le poids de la voie de transfert par les ouvrages.

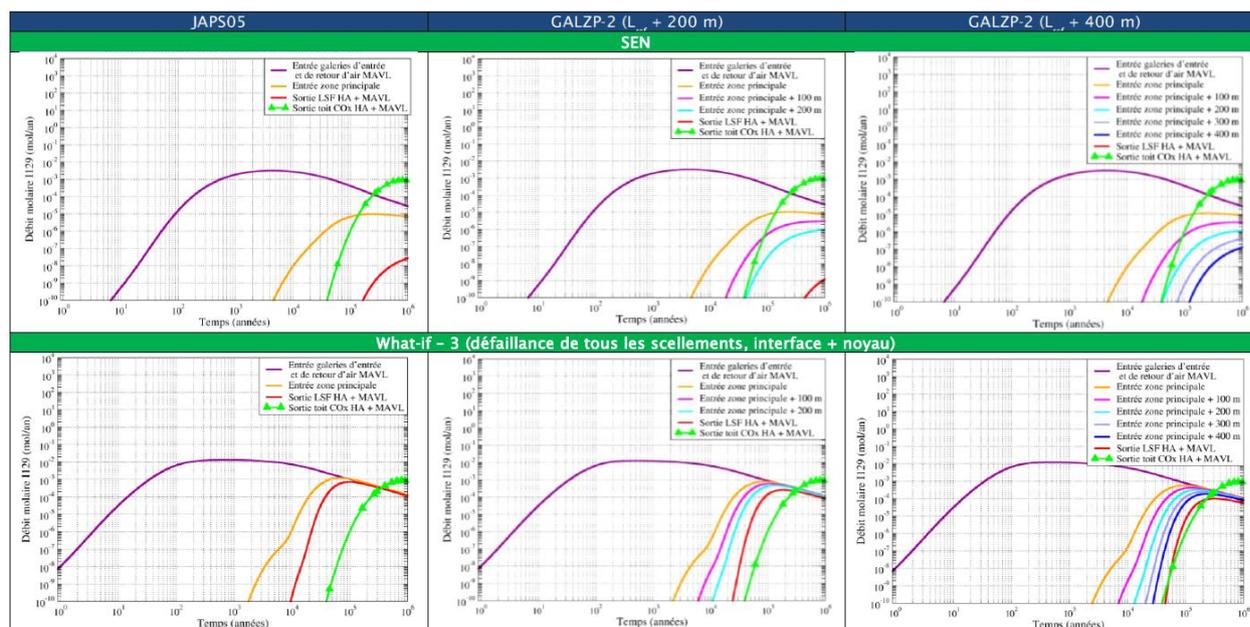


Figure 82 : Influence de la longueur des galeries de liaison - SEN et What-if 3 en situation « de référence », quartier MAVL, 129I : débits molaires au niveau des indicateurs intermédiaires et sortant des ouvrages de liaison surface-fond (en rouge) et du Callovo-Oxfordien (en vert). (Andra, [123]). Le modèle JAPS05 correspond au modèle utilisé dans les évaluations d'impact présentées dans le DOS (L_{ref} ≈ 300 m). Les modèles GALZP-2 (L_{ref}+200m) et GALZP-2 (L_{ref}+400m) postulent des allongements de galerie respectivement de 200 m et 400 m.

Sur la base des résultats de l'Andra, l'IRSN constate cependant (cf. Figure 82) que l'allongement des galeries de liaisons d'une longueur de 400 m (qui permet ainsi de passer d'une longueur de galerie de 300 m environ à une longueur de 700 m environ) permet, dans les conditions hydrauliques retenues par l'Andra, d'atténuer d'un ordre de grandeur les débits molaires estimés en sortie de liaisons surface-fond et de retarder le transfert des radionucléides de quelques centaines de milliers d'années pour l'¹²⁹I ; les débits molaires estimés en sortie du toit du Callovo-Oxfordien sont alors supérieurs d'un ordre de grandeur à ceux estimés en sortie des liaisons surface-fond. L'IRSN souligne que les effets d'un tel retard seront très significatifs pour les débits molaires des radionucléides à vie plus courte, comme le ¹⁴C (cf. chapitre 8.2.2 du présent rapport), vers les liaisons surface-fond (diminution d'environ 5 à 6 ordres de grandeur des débits molaires estimés). A cet égard, l'IRSN constate que l'Andra spécifie une distance minimale entre les liaisons surface-fond et les quartiers contenant les colis de 300 m ou 500 m (selon l'inventaire radiologique des déchets) dans ses exigences [55] et retient, comme indiqué en cours d'instruction, une distance supérieure à 700 m entre les puits et le quartier MAVL, qui est le principal contributeur aux débits molaires estimés en sortie des liaisons surface-fond. L'IRSN constate que ces résultats montrent l'intérêt d'un allongement de la distance entre la zone des puits et les quartiers de stockage sur l'atténuation des débits de radionucléides par les ouvrages. A cet égard, l'IRSN considère pertinent que l'Andra retienne une longueur supérieure à 700 m entre les puits et le quartier MAVL.

De plus, même si l'IRSN convient que, pour des situations hydrauliques plus pénalisantes que la situation « de référence », l'allongement de la distance entre la zone des puits et les quartiers de stockage a peu d'influence sur les débits de radionucléides tels que l'¹²⁹I, le ³⁶Cl et le ⁷⁹Se qui ne décroissent pas, celle-ci conserve un véritable intérêt pour les radionucléides à vie plus courte (¹⁴C).

Ainsi, en considérant notamment un gradient hydraulique ascendant de 0,6 m/m dans le Callovo-Oxfordien (cf. chapitre 8.2.2 et Annexe T17), l'IRSN note que les transferts de radionucléides dans les ouvrages, essentiellement par le béton du revêtement/soutènement dans les galeries (perméabilité égale à 10⁻⁶ m/s) dont la capacité à

s'opposer à la circulation de l'eau est faible¹⁰², sont beaucoup plus rapides (quelques milliers d'années) que ceux estimés par l'Andra en situation « *de référence* ». A cet égard, l'atténuation obtenue par l'allongement des galeries de 1 200 m pour les débits molaires de ¹⁴C est marquée (facteur 6) et concerne une faible proportion de l'inventaire (1,5 % de l'inventaire radiologique du ¹⁴C, cf. Annexe T17). **L'allongement des galeries limiterait donc la contribution de ce radionucléide à l'impact du stockage, notamment si l'on tient compte d'un exutoire dans l'Oxfordien (cf. chapitre 8.2.1.3).**

Enfin, l'Andra indique que, compte tenu de la position des quartiers HA en aval hydraulique par rapport aux liaisons surface-fond vis-à-vis des écoulements, les scellements dans les quartiers HA et dans la zone principale sont peu sollicités sur le plan hydraulique. Aussi, l'Andra estime que la réduction du nombre de scellements de 8 à 4 dans la zone principale et la suppression de 6 scellements de galeries dans le quartier HA1/HA2 n'a pas d'influence significative sur la performance après fermeture du système de stockage. L'IRSN note que ces suppressions de scellements conduiraient à conserver deux scellements de galeries entre les alvéoles de stockage et les liaisons surface-fond ainsi que les scellements des liaisons surface-fond. **Au regard des performances allouées par l'Andra aux scellements en situation « de référence » comme en situation « enveloppe », l'IRSN estime que cette piste d'optimisation (nombre de scellements) est effectivement envisageable dans la mesure où cette zone est amenée à rester en aval hydraulique des liaisons surface-fond dans le prochain million d'années (cf. chapitre 4.6.3).**

8.2.4 BILAN DES ETUDES DE SENSIBILITE A L'ARCHITECTURE DU STOCKAGE

En conclusion, l'IRSN observe que l'Andra base la conception de l'installation souterraine de stockage sur plusieurs grands principes architecturaux qui permettent de mettre à profit les propriétés hydrauliques du Callovo-Oxfordien. Les études portant sur ces grands principes présentées au stade du DOS complètent ainsi en termes d'évaluation du fonctionnement global du stockage celles des « Dossier 2005 » et « Dossier 2009 ». L'Andra considère que l'évaluation des pistes d'optimisation qu'elle retient au stade du DOS se conçoit aussi d'un point de vue technico-économique, en particulier pour celles relatives à une diminution des linéaires de galeries dans les quartiers de stockage et à une diminution du nombre de scellements. L'IRSN convient que ces pistes d'optimisation ne devraient pas conduire à augmenter de façon significative l'impact radiologique à long terme du stockage dans la situation « *de référence* » du SEN.

Néanmoins, un des critères pertinents à retenir pour juger du bien-fondé des options de conception consiste, selon l'IRSN, à vérifier que dans tous les scénarios envisagés, le transfert de radionucléides par les ouvrages reste significativement inférieur au transfert des radionucléides à travers la roche hôte. **A cet égard, l'IRSN considère que l'Andra devrait se doter d'une contrainte de dimensionnement de Cigéo prenant en compte quantitativement ce critère.**

Considérant les performances hydrauliques visées, les scellements apparaissent comme des ouvrages essentiels pour limiter ce transfert de radionucléides par les ouvrages. En particulier, les scellements de galeries sont à même

¹⁰² L'influence du béton de revêtement/soutènement sur les transferts par les ouvrages est également évaluée au travers d'un calcul de l'IRSN pour lequel la combinaison d'un allongement de galeries de 1 500 m et d'une dépose du béton du revêtement/soutènement des galeries par un matériau de meilleures performances (perméabilité égale à 10⁻⁸ m/s) sur plusieurs centaines de mètres, dans le cas où cette dépose serait envisageable, pour atténuer les débits molaires en ¹²⁹I estimés à la sortie des liaisons surface-fond d'un ordre de grandeur et ceux du ¹⁴C d'un facteur 50 000 (cf. Annexe T17).

d'apporter une redondance des scellements des liaisons surface-fond, dans l'optique de disposer d'un système de lignes de défense qui se complètent et dans une certaine mesure, se suppléent. Aussi, l'IRSN souligne que la suppression de plusieurs scellements de galerie dans la conception de Cigéo fait reposer un poids supplémentaire sur la bonne réalisation de tous les autres scellements. De plus, l'IRSN estime que la fonction des scellements de galerie ne se limite pas à s'opposer à la circulation de l'eau dans le stockage, mais également à fractionner l'inventaire stocké de sorte à minimiser les conséquences d'un scénario d'intrusion humaine (cf. chapitre 8.2.5). Or, l'IRSN appelait l'attention en 2014 sur la difficulté de la réalisation d'un démonstrateur complet *in situ* à l'échelle 1 d'un scellement de galeries, en raison de l'extrême lenteur de sa cinétique de resaturation, afin de fournir des éléments de démonstration de la performance hydraulique de ces ouvrages de fermeture. **La démonstration des performances de ces scellements ne sera toutefois accessible qu'après la DAC, aussi l'IRSN considère important d'explorer d'autres pistes visant à ce que les transferts de radionucléides par les ouvrages soient négligeables.**

A cette fin, l'allongement des galeries entre les quartiers de déchets et les ouvrages de liaisons surface-fond permettrait de pallier partiellement un éventuel dysfonctionnement de ces scellements, en augmentant les temps de transfert des radionucléides à travers les ouvrages, et ainsi d'atténuer les flux de radionucléides de période relativement courte dans le contexte du stockage géologique, comme le ^{14}C . Par ailleurs, les radionucléides atteignant les liaisons surface-fond proviennent essentiellement du quartier MAVL placé en amont hydraulique de la zone des puits et de la descenderie. Dans la mesure où aucune fonction de confinement n'est retenue pour les colis MAVL à long terme, l'IRSN rappelle donc que, sur le plan qualitatif, le positionnement des liaisons surface-fond en amont hydraulique du quartier MAVL pourrait minimiser les transferts de radionucléides par les ouvrages. **Cette option de conception relative au positionnement des liaisons surface/fond pourrait ainsi être une piste d'optimisation de l'architecture du stockage.**

L'IRSN rappelle que la pertinence de toute option d'architecture ne peut s'apprécier uniquement sur un critère de radioprotection à long terme, mais doit être mise en regard de la sûreté en exploitation, dans l'esprit de la demande 2014 D2 de l'ASN [1] (cf. chapitre 6.2.2). A cet égard, l'IRSN regrette que l'Andra n'ait pas présenté, dans l'analyse appelée au stade du DOS par cette demande, une analyse d'options d'architecture (positionnement des liaisons surface-fond en amont hydraulique des quartiers de stockage, allongement des longueurs des galeries...) qui permette d'évaluer l'impact des pistes d'optimisation qu'elle retient vis-à-vis de la sûreté en exploitation. **La demande de l'ASN 2014 D2 [1] reste donc d'actualité. En outre, l'IRSN appelle l'attention sur les conséquences du manque de maturité de ces études d'optimisation à une échéance proche du dépôt de dossier de DAC, en particulier vis-à-vis de la justification de la conception *in fine* retenue, au regard des contraintes de dimensionnement de l'installation que l'Andra s'impose.**

R4. L'IRSN recommande que l'Andra retienne, dans le dossier de DAC, une architecture de stockage qui procure une redondance avérée de la fonction des scellements des liaisons surface-fond, en considérant au moins les lignes de défense suivantes et leur combinaison : (i) les scellements de galerie performants, (ii) la distance entre les quartiers de stockage et la base des liaisons surface-fond, et (iii) le positionnement des liaisons surface-fond en amont hydraulique des quartiers de stockage. Celle-ci sera justifiée par une étude des avantages et inconvénients de différentes options, vis-à-vis de la sûreté en exploitation et à long terme.

Dans cette perspective, l'IRSN appelle l'attention sur l'intérêt de définir la proportion tolérable de radionucléides qui peut transiter par les ouvrages vers l'Oxfordien et d'utiliser ce critère pour les évaluations d'optimisation de l'architecture du stockage.

8.2.5 SCENARIOS D'INTRUSION HUMAINE INVOLONTAIRE

Compte tenu de la profondeur d'implantation de Cigéo, l'Andra estime que le seul mode d'intrusion involontaire à prendre en considération est un forage réalisé depuis la surface. Sur cette base, l'Andra définit des « situations de forage » qui tiennent compte des objectifs du forage (exploration, exploitation d'eaux souterraines, géothermie, hydrocarbures) et de la formation géologique ciblée, qui déterminent la profondeur visée et les diamètres du forage, la localisation du forage par rapport à l'architecture du stockage ainsi que l'état du forage (réalisation, exploitation ou abandon).

S'agissant des cibles potentielles d'exploration et d'exploitation de ressources, l'Andra définit les formations géologiques suivantes :

- les calcaires du Barrois et les niveaux perméables de l'Oxfordien et du Dogger, pour l'investigation d'une ressource en eau supposée, ou son exploitation si celle-ci est avérée ;
- le Callovo-Oxfordien, pour l'investigation scientifique avec prélèvement de carottes ;
- le Permien et le Stéphaniens, pour des investigations liées à des ressources en hydrocarbures. L'Andra indique que les connaissances disponibles concernant les potentialités de ressources en hydrocarbures conventionnels ou non conventionnels écartent la possibilité d'une exploitation au droit de la ZIRA (cf. chapitre 4.2.2) ;
- le Trias (pour partie) et le Permien, pour l'utilisation de l'énergie géothermique, bien que :
 - pour ce qui concerne le Trias (grès du Buntsandstein), l'Andra estime que cette formation ne présente pas de caractéristiques locales exceptionnelles, notamment en termes de température ;
 - pour ce qui concerne le Permien, l'Andra indique qu'il n'y a pas d'informations précises quant aux caractéristiques hydrauliques et thermiques dans la perspective d'une exploitation géothermique.

S'agissant de l'incidence des phases de vie des forages, l'Andra estime que les premiers forages intrusifs ne seront réalisés que 500 ans après la fermeture de l'installation, ce qui correspond à la durée minimale de conservation de la mémoire du stockage au sens du Guide de l'ASN relatif au stockage géologique [3]. L'Andra indique que les conséquences de la phase d'exploitation des forages sont un prélèvement d'eau dans des formations exploitées contenant des radionucléides issus du stockage. Pour les forages abandonnés, l'Andra suppose que les tubages éventuels sont corrodés et les obturations dégradées ; l'Andra retient une perméabilité proche de celle d'un sable pour caractériser le forage. L'Andra estime que les forages intrusifs abandonnés peuvent constituer un court-circuit

local des gardes supérieure et inférieure du Callovo-Oxfordien de telle sorte qu'un flux d'eau s'établit en fonction de la différence de charge entre les aquifères inférieurs et supérieurs.

S'agissant de la localisation des forages, l'Andra distingue les forages susceptibles de perturber le système de stockage de ceux susceptibles d'intercepter les panaches de radionucléides. Ainsi, l'Andra identifie huit localisations possibles (cf. Figure 83).

Localisations possibles des forages par rapport au système de stockage Cigéo.			
Type de localisation	Description	Commentaires	
L1	Au droit d'alvéoles de stockage de colis de déchets : - tunnels MAVL - micro-tunnels HA.	Le forage pénètre dans un alvéole de stockage, voire dans les colis; dans le second cas l'extraction de carottes contenant des déchets peut être envisagée. Selon les cas, le forage est poursuivi à plus grande profondeur au travers de la garde inférieure, ou il est arrêté à la cote du stockage.	Situation d'intrusion au sens strict.
L2	Au droit de galeries d'accès aux alvéoles de stockage des déchets, dans les quartiers.	Le forage pénètre dans une galerie d'accès aux alvéoles de stockage. Selon les cas, le forage est poursuivi à plus grande profondeur au travers de la garde inférieure, ou il est arrêté à la cote du stockage.	- Situation d'intrusion au sens strict - Seules les galeries d'accès aux micro-tunnels HA seront traitées; l'intrusion dans un tunnel MA-VL "couvre" l'intrusion dans toute galerie du quartier MA-VL.
L3	Au travers de l'architecture, sans contact avec les ouvrages ni avec leur zone de fracturation connectée.	Le forage dépasse la profondeur du stockage, en passant à l'intérieur du périmètre du stockage, mais sans toucher directement les ouvrages.	- Le cas de l'interception de l'EDZ est "couvert" par le cas d'un forage touchant les composants ouvrages et y pénétrant. (cas L1 et L2) - Les situations sans contact sont considérées conventionnellement dans le cadre des intrusions. En pratique elles n'auront aucun effet négatif sur le fonctionnement du stockage.
L4	Dans le panache de radionucléides issu du stockage et migrant dans les formations de l'Oxfordien.	- Le forage est situé dans le panache de radionucléides issu du stockage c'est à dire au droit de la projection verticale du stockage ou en aval hydraulique.	- Situation de type "action humaine" puisque ni le Callovo-Oxfordien ni le stockage ne sont atteints.
L5	Dans le panache de radionucléides issu du stockage et migrant dans les formations du Dogger	- Le forage est situé dans le panache de radionucléides issu du stockage et migrant dans les horizons sous-jacents du Dogger. - L'axe de plus forte concentration en radionucléides commence en aval immédiat du stockage et se prolonge dans la direction des écoulements hydrauliques du Dogger qui conduisent vers la zone de fracturation diffuse avant de s'infléchir vers le Sud.	- La situation peut correspondre à une intrusion humaine si le forage est réalisé à l'intérieur de la projection du stockage. - Il est considéré que les potentialités au droit de la ZIRA n'y justifient pas un forage d'exploitation effective des eaux souterraines pour l'alimentation.
L6	Dans la zone de fracturation située à l'ouest de la ZIRA (Dogger)	Le forage se situe dans la zone de fracturation, située à l'Ouest et au Sud-Ouest de la ZIRA, en raison d'une meilleure transmissivité. Sa profondeur est supposée suffisante pour capter l'eau des formations perméables du Dogger.	- Situation de type "action humaine". - Cet exutoire est du même type que celui retenu comme exutoire "Dogger" dans le cadre du SEN.
L7	Dans la zone de fracturation de la Marne (Oxfordien)	Le forage serait un point de prélèvement au droit de la zone de fracturation de la vallée de la Marne qui constitue un exutoire pour certains écoulements de l'Oxfordien.	- Pour mémoire. Cet exutoire naturel n'est pas susceptible d'être atteint par les radionucléides issu du stockage au cours du premier million d'années après fermeture.
L8	Au droit ou à proximité de l'exutoire naturel du Dogger	Le forage, voire le puits de faible profondeur, représente un point de prélèvement au droit ou à proximité de l'exutoire naturel du Dogger. Les simulations géoprospectives montrent un déplacement de cet exutoire vers l'Est vers 400 000 ans.	- Situation de type "action humaine". - Cette situation est "couverte" par la localisation L6 qui est un point intermédiaire sur le trajet de migration entre le stockage et l'exutoire naturel L8.

Figure 83 : Localisations possibles des forages par rapport au système de stockage et aux panaches de radionucléides [40]

Sur la base de ces trois critères (formation géologique ciblée, phase de vie du stockage, localisation), l'Andra classe les situations de forage en vertu de leur niveau de vraisemblance. Les situations peu probables sont traitées en [SEA](#), alors que les situations très peu probables ou les combinaisons de situations peu probables sont traitées en scénario *What-if*.

Ainsi, l'Andra définit six scénarios (cf. Figure 84) qu'elle considère comme « enveloppes » des situations identifiées sur la base des critères ci-dessus :

- Situation SIHFor-1 (localisation L1, cf. Figure 83) - Scénario [SEA](#) d'exposition à des carottes contenant des déchets.

- Situation SIHFor-2c (localisations L1 et L2) - Scénario SEA impliquant un forage d'exploration au Dogger abandonné à la cote du stockage constituant un court-circuit de la garde supérieure de Callovo-Oxfordien.
- Situation SIHFor-2b (localisations L1 et L2) - Scénario SEA impliquant un forage d'exploration au Dogger abandonné à sa cote prévisionnelle constituant un court-circuit local des gardes supérieures et inférieures de Callovo-Oxfordien et induisant une possibilité de migration des radionucléides vers les exutoires du Dogger.
- Situation SAHFor-1 (localisation L4) - Scénario « What-if » d'exploitation d'un forage captant les horizons perméables de l'Oxfordien calcaire.
- Situation SIHFor-3 (localisations L1 et L2) - Scénario « What-if » impliquant un forage d'exploitation géothermique du Trias abandonné à la profondeur du stockage constituant un court-circuit de la garde supérieure de Callovo-Oxfordien.
- Situation SIHFor-2a (localisations L1 et L2) - Scénario « What-if » de dégazage d'un alvéole MAVL ou d'une galerie HA pendant le transitoire de resaturation combinant potentiellement les impacts immédiats et de courte durée au moment du contact avec le stockage, ou à plus longue échéance en cas d'éjection d'eau contenant des radionucléides.

Pour les situations SIHFor-2c et SIHFor-3, l'Andra indique que l'exutoire retenu est un pompage d'exploitation en eau dans le Barrois dans le panache de radionucléides transférés par les forages abandonnés jusqu'à ces calcaires.

Ces situations de forage illustrées (cf. Figure 84) n'ont pas toutes été évaluées au stade du DOS, mais le seront, selon l'Andra, dans le dossier de DAC. En outre, l'Andra indique que la prise en compte de plusieurs forages abandonnés sera également évaluée à cette échéance.

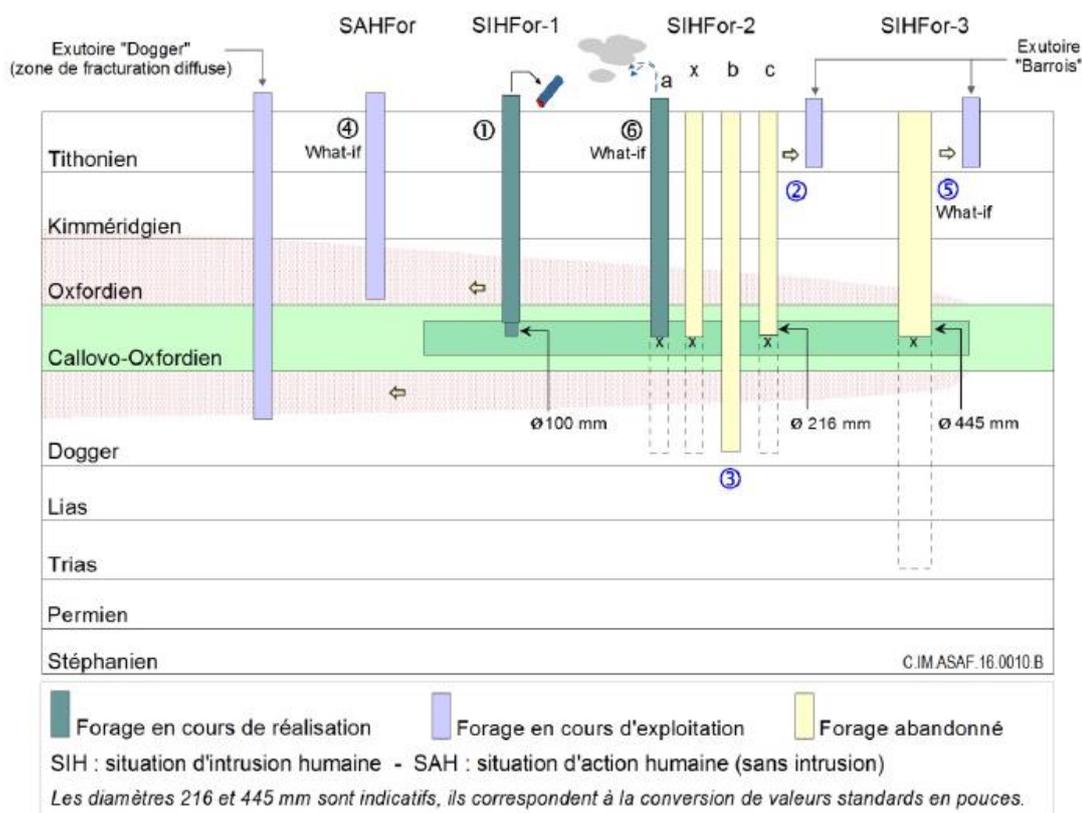


Figure 84 : Représentation des situations de forages retenus pour l'évaluation de sûreté après fermeture à l'échéance de la DAC [40]

L'IRSN observe que la démarche de l'Andra s'inscrit dans les réflexions du projet HIDRA de l'AIEA sur l'utilisation de scénarios stylisés, en particulier basés sur des forages intrusifs pour les stockages en profondeur et que les scénarios sélectionnés embrassent en outre un ensemble large de situations d'intrusion humaine qui peuvent être rencontrées dans le cas d'un stockage en profondeur de déchets radioactifs. L'IRSN note en particulier que les conséquences d'un forage visant à utiliser l'énergie géothermique dans le Trias, abandonné au niveau du stockage, seront évaluées dans le dossier de DAC, même si l'Andra estime que cette formation ne présente pas de caractéristiques locales exceptionnelles. A cet égard, l'IRSN rappelle qu'elle convient de l'absence de ressources en hydrocarbures de caractère exceptionnel dans cette formation au droit du stockage. Toutefois, au titre de la robustesse de la démonstration de sûreté, l'exploitation au droit du stockage pourrait être envisagée (cf. chapitre 4.2.2). Il conviendra alors d'évaluer les conséquences de l'abandon de plusieurs forages d'exploitation (et non d'un seul) ou de justifier qu'elles sont couvertes par celles d'une autre situation (par exemple, exploitation des ressources géothermiques du Trias).

Au stade du DOS, l'IRSN n'a pas examiné le caractère enveloppe des évaluations réalisées par l'Andra. L'IRSN relève néanmoins les points suivants.

S'agissant des hypothèses retenues pour son évaluation de l'impact des situations de forages, afin de limiter les évaluations à des situations « enveloppes », l'Andra prend en compte un inventaire majorant pour l'ensemble des radionucléides des zones de stockage perturbées par la présence d'un forage. A cet égard, l'IRSN estime que, parmi les critères retenus par l'Andra, la date d'occurrence des premiers forages intrusifs (500 ans après la fermeture du stockage, en accord avec le guide de l'ASN relatif au stockage géologique [3]) se révèle être une hypothèse forte dans la mesure où elle conditionne l'inventaire qui pourra être mobilisé en cas d'intrusion humaine. Ceci n'appelle pas de commentaire de la part de l'IRSN.

S'agissant des écoulements dans le stockage, les modélisations de l'Andra montrent que les forages peuvent fortement perturber le comportement hydraulique dans les zones de stockage. L'Andra indique que les débits d'eau drainés par ces forages peuvent être de l'ordre du m^3/an , soit équivalents aux débits drainés par les liaisons surface-fond en cas de dysfonctionnement des scellements. L'IRSN observe donc que les forages abandonnés peuvent s'assimiler à des puits de petit diamètre mal scellés et constituent un court-circuit pour les transferts de radionucléides. En particulier, l'Andra indique qu'un forage abandonné à la cote des galeries d'accès du quartier HA peut perturber hydrauliquement 1/6^e de ce quartier. Dans ce cas, l'IRSN constate que cette perturbation s'étend jusqu'à l'emplacement des scellements de galeries de liaison de ce quartier. En outre, un forage abandonné à la cote des alvéoles MAVL peut perturber hydrauliquement l'entièreté du quartier MAVL si les scellements des alvéoles MAVL sont constitués d'un matériau équivalent à du remblai. L'extension de cette perturbation hydraulique est réduite à l'alvéole traversée par le forage lorsque ces mêmes scellements sont efficaces, ce qui renforce l'importance de ces derniers dans le cas d'une intrusion, au titre du fractionnement de l'inventaire (cf. infra).

En termes d'impact dosimétrique, l'IRSN constate que la prise en compte d'un forage dans les scénarios d'intrusion humaine au stade du DOS peut conduire à des niveaux d'exposition relativement élevés en comparaison de ceux des SEN et SEA. Pour le scénario SIHFor-1, le foreur reçoit des doses pouvant atteindre quelques dizaines de mSv/an dues essentiellement à l'exposition au rayonnement de ^{241}Am et du ^{94}Nb sur quelques dizaines de minutes. Pour le scénario SIHFor-3, l'IRSN appelle l'attention sur des niveaux d'exposition dus à l'ingestion d'eau pompée dans le

Barrois contenant de l' ^{108m}Ag et de ^{210}Pb qui, cumulés tout au long d'une vie, pourraient devenir significatifs pour les individus du groupe de référence « multiactivités » retenus par l'Andra.

Sur la base des éléments présentés par l'Andra, l'IRSN observe ainsi qu'un forage traversant l'installation de stockage peut mobiliser une partie conséquente de l'inventaire stocké. De plus, l'IRSN observe que les actinides, qui sont fortement sorbés dans les matériaux cimentaires et dans l'argilite de la roche hôte, sont mobilisés dans le cas d'un scénario postulé d'intrusion humaine par forage dans le stockage et pourraient conduire à des conséquences radiologiques importantes dans le cas de pompage dans un aquifère connecté au forage précité. Aussi, l'IRSN estime que des scellements dans les galeries dans le quartier HA et des scellements d'alvéoles MAVL pourraient contribuer à fractionner l'inventaire et limiter l'extension de la perturbation hydraulique, dans le cas d'un scénario postulé d'intrusion humaine par forage dans le stockage. A l'inverse, l'IRSN observe que la piste d'optimisation de l'Andra consistant à accroître le nombre de colis par alvéole, en réalisant des ouvrages plus grands, ne va pas dans un sens favorable à cette limitation d'impact. S'il est judicieux de questionner la conception du stockage au regard de scénarios postulés d'intrusion humaine, notamment pour identifier des options qui permettraient de minimiser l'impact de leur occurrence, il convient toutefois, selon l'IRSN, de relativiser leur poids dans cette conception. En effet, ces scénarios restent dans une large mesure postulés en effaçant plusieurs fonctions de sûreté de l'installation (confinement, isolation), reposant ainsi sur des hypothèses volontairement maximalistes. **Aussi, l'IRSN salue les études menées à cette fin par l'Andra et constate qu'au stade du DOS, elles ont une faible influence sur les options de conception retenues.**

En outre, l'IRSN rappelle qu'au stade du DOS, l'impact chimique à long terme du stockage sur l'homme et l'environnement n'a pas été évalué. Cette évaluation dans le cadre des scénarios d'intrusion devra être présentée dans le dossier accompagnant la DAC.

8.2.6 PRISE EN COMPTE DES COMBUSTIBLES USES ET DES RESERVES

L'Andra présente [47] l'évaluation de sûreté à long terme du stockage en prenant en compte les combustibles usés, dont l'inventaire et le modèle de relâchement sont examinés par l'IRSN dans le chapitre 3.6.4. Pour cette évaluation, l'Andra retient les hypothèses et données définies dans les SEN et SEA de dysfonctionnement des scellements et présente les débits molaires de l' ^{129}I estimés au toit et au mur du Callovo-Oxfordien et en sortie de liaison surface-fond. Sur cette base, l'IRSN constate que les débits molaires maximaux enregistrés au toit et au mur du Callovo-Oxfordien en prenant en compte les combustibles usés (environ 10^{-1} mol/an au maximum) sont supérieurs d'un ordre de grandeur à ceux évalués pour l'inventaire de référence (moins de 10^{-2} mol/an). L'Andra ne présente pas d'évaluation de dose due à la prise en compte des combustibles usés. Néanmoins, par comparaison avec les évaluations réalisées pour le stockage de déchets vitrifiés et de déchets MAVL, l'IRSN note que les doses dues à l' ^{129}I resteraient inférieures à la contrainte de dose (0,25 mSv) préconisée dans le guide ASN relatif à l'évaluation à long terme d'un stockage en profondeur, **ce qui n'appelle pas de commentaire particulier de la part de l'IRSN à ce stade.**

Pour ce qui concerne les déchets « en réserve », l'IRSN note que l'augmentation de l'inventaire stocké consécutive à leur prise en compte est relativement faible pour les principaux contributeurs à la dose (au maximum 10 % pour le ^{14}C , 5 % pour le ^{36}Cl et 4 % pour l' ^{129}I). Aussi, l'IRSN convient que l'augmentation de l'impact du stockage liée à cet inventaire supplémentaire serait également faible.

9 CONCLUSION GENERALE

La constitution du Dossier d'options de sûreté (DOS) de Cigéo marque la dernière étape majeure de consolidation des options de conception du stockage et des exigences de sûreté associées avant la demande d'autorisation de création (DAC) de l'installation de stockage en formation géologique profonde, que l'Andra prévoit de déposer en 2018. L'examen de ce dossier par l'IRSN, à la demande de l'ASN, a eu pour principal objectif d'évaluer l'état de maturité de ce dossier afin de juger de la pertinence, du point de vue de la sûreté et de la radioprotection, des options retenues et d'identifier si des modifications majeures de conception devaient être apportées.

Sur la base des éléments remis par l'Andra, l'IRSN souligne les efforts substantiels consentis par l'Andra pour composer le DOS, qui fait état, sur un grand nombre de thématiques, de progrès significatifs dans la définition et la prise en compte des exigences de sûreté dans la conception du stockage, notamment eu égard aux risques en phase d'exploitation, ainsi que dans la constitution des bases de connaissances en support à l'analyse du comportement du stockage à court et à long terme.

L'IRSN estime que le projet a atteint, dans l'ensemble, une maturité technique satisfaisante au stade d'un DOS. A cet égard, l'IRSN note en particulier la bonne identification des risques à considérer pour les phases d'exploitation et après fermeture du stockage, la pertinence de choix dimensionnants sur la gestion de la coactivité ainsi que la conception approfondie des procédés de manutention et des dispositions de sûreté qui leur sont associées. La conception des installations de surface a également progressé et permet d'avoir une première vision de l'ensemble des installations nécessaires aux opérations de stockage, sur lequel l'IRSN n'a pas identifié de manque ni d'écueil majeur dans les options de sûreté retenues.

S'agissant de l'analyse des risques liés à la phase d'exploitation et à l'exigence de réversibilité ainsi que des risques à long terme, l'IRSN a identifié des compléments importants à apporter mais considère que les éléments de démonstration de la maîtrise de l'essentiel de ces risques devraient pouvoir être réunis sans nécessité de révision significative des concepts dans le cadre de la constitution du dossier de DAC, sans toutefois présager de l'échéance à laquelle ce dossier pourra *in fine* être achevé.

Néanmoins, la possibilité d'aboutir à une démonstration de sûreté probante pose question pour quatre points majeurs, ce qui pourrait entraîner des modifications substantielles de la conception du stockage. Ces points concernent la maîtrise des risques liés à l'incendie dans un alvéole de stockage de colis d'enrobés bitumineux, la prise en compte de certaines situations accidentelles pour l'exploitation de l'installation souterraine, la faisabilité de la surveillance de paramètres clés de la sûreté de Cigéo et l'optimisation du point de vue de la sûreté de l'architecture du stockage.

S'agissant du stockage des colis d'enrobés bitumineux, l'IRSN considère, contrairement à l'Andra, que le risque d'un emballement de réactions exothermiques dans ces colis conduisant à un rejet important d'activité dans l'environnement ne peut être exclu en cas d'incendie. A cet égard, l'IRSN estime qu'une solution de neutralisation de la réactivité des enrobés bitumineux en vue de leur stockage doit être privilégiée. Si un tel procédé ne pouvait être mis en œuvre, des évolutions de conception majeures des alvéoles MAVL seraient nécessaires par rapport à la conception présentée au stade du DOS, pour réduire au mieux les risques et les conséquences liés au stockage des déchets bitumés en l'état.

S'agissant des conséquences de certaines situations accidentelles pour l'exploitation de l'installation souterraine, l'IRSN rappelle qu'une indisponibilité prolongée de Cigéo, qui constitue l'unique exutoire pour les déchets HA et MAVL, aurait des répercussions sur les installations en amont de la filière de gestion de ces déchets susceptibles d'affecter la sûreté d'ensemble de cette filière. Au-delà de la prévention des situations accidentelles, la possibilité d'intervenir, et le cas échéant de réhabiliter l'installation, doit constituer une priorité. L'IRSN constate que l'Andra n'a, à ce stade, toujours pas intégré cet aspect dans sa démarche de sûreté, en particulier la possibilité de retrait de colis accidentés avec des moyens définis dès la conception.

S'agissant de la surveillance de paramètres clés de la sûreté de Cigéo, le DOS présente des lacunes importantes dans la stratégie de surveillance et dans la définition des moyens à mettre en œuvre. L'IRSN rappelle que la surveillance des paramètres d'exploitation et du comportement des alvéoles de stockage est une composante importante de la démonstration de sûreté de l'installation. A cet égard, l'IRSN souligne que les particularités de Cigéo (installation souterraine, durée d'exploitation, ouvrages difficilement accessibles, nature des paramètres à surveiller...) requièrent la mise en œuvre de dispositions sur lesquelles un retour d'expérience n'est pas forcément disponible. A ce stade, l'IRSN s'interroge sur la compatibilité de la conception retenue avec les moyens à mettre en œuvre pour exercer une surveillance adaptée aux enjeux particuliers posés par la maîtrise des risques, en exploitation comme à long terme.

Enfin, pour ce qui concerne l'architecture du stockage, l'IRSN estime que l'Andra n'a pas présenté une analyse suffisante des options d'optimisation de l'architecture du stockage (positionnement des liaisons surface-fond, longueurs des galeries, nombre et performances des scellements...) pour justifier le bien fondé du choix retenu au stade du DOS. Ce point reste un attendu important du dossier de DAC et les options retenues devront permettre de compenser la défaillance possible d'ouvrages de scellements, notamment des liaisons surface-fond, afin notamment d'assurer que le transfert des radionucléides par ces liaisons reste suffisamment limité.

RECOMMANDATIONS

R1. Aussi, l'IRSN recommande que, dans le dossier de DAC, le scénario d'incendie de dimensionnement de l'installation de surface mette en jeu l'intégralité du contenu du colis primaire le plus sensible à l'incendie, en l'occurrence un colis d'enrobé bitumineux si l'option de leur stockage est maintenue. 68

R2. En conséquence, l'IRSN recommande que l'Andra apporte, dans les meilleurs délais et en tout état de cause au plus tard lors du dépôt du dossier de DAC, un ensemble d'éléments permettant de statuer sur la possibilité de mettre en œuvre un procédé permettant la neutralisation de la réactivité des déchets bitumés préalablement à leur mise en stockage. 84

R3. L'IRSN recommande que l'Andra retienne, dans le dossier de DAC, le spectre enveloppe des deux hypothèses présentées (modèle structural régional et modèle du séisme flottant). 159

R4. L'IRSN recommande que l'Andra retienne, dans le dossier de DAC, une architecture de stockage qui procure une redondance avérée de la fonction des scellements des liaisons surface-fond, en considérant au moins les lignes de défense suivantes et leur combinaison : (i) les scellements de galerie performants, (ii) la distance entre les quartiers de stockage et la base des liaisons surface-fond, et (iii) le positionnement des liaisons surface-fond en amont hydraulique des quartiers de stockage. Celle-ci sera justifiée par une étude des avantages et inconvénients de différentes options, vis-à-vis de la sûreté en exploitation et à long terme. 185

REFERENCES

- [1] Saisine de l’Autorité de Sûreté Nucléaire ASN CODEP-DRC-2016-021886 du 2 août 2016.
- [2] Lettre ASN CODEP-DRC-2014-039834 du 19 décembre 2014 - Options de sûreté du projet Cigéo.
- [3] Guide de sûreté de l’ASN relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde - février 2008.
- [4] Arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base (NOR : DEVP1202101A, version consolidée du 05/02/2016).
- [5] Décision n° 2015-DC-0532 de l’Autorité de sûreté nucléaire du 17 novembre 2015 relative au rapport de sûreté des installations nucléaires de base.
- [6] Avis n° 2016-AV-0259 de l’Autorité de sûreté nucléaire du 25 février 2016 sur les études relatives à la gestion des déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue (HA et MA-VL) remises en application du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2013-2015, en vue de l’élaboration du Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs 2016-2018.
- [7] Avis n° 2016-AV-0267 de l’Autorité de sûreté nucléaire du 31 mai 2016 relatif à la réversibilité du stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde.
- [8] Agence Internationale de l’Énergie Atomique - Revue Internationale par les pairs sur le « Dossier d’Options de Sûreté » du projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde : Cigéo. Rapport de la revue par les pairs, novembre 2016.
- [9] Loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs.
- [10] Délibération du conseil d’administration de l’Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs du 5 mai 2014 relative aux suites à donner au débat public sur le projet Cigéo.
- [11] Loi n° 2016-1015 du 25 juillet 2016 précisant les modalités de création d’une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue. <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/loi/2016/7/25/DEVX1614324L/jo/texte>
- [12] Lettre ASN/CODEP-DRC-2014-016991 du 10 juillet 2014 - de stockage Cigéo – Examen du dossier « Maîtrise des risques en exploitation au niveau esquisse et phasage du projet Cigéo ».
- [13] Rapport IRSN DSU n° 106, Avis de l’Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire sur le « Dossier 2005 Argile », présenté devant le GPD les 12-13 décembre 2005.
- [14] Avis GPD/05-16, Avis et Recommandations du Groupe Permanent « Déchets » du 12/12/2005 et du 13/12/2005 - Stockage Géologique - Examen du « Dossier 2005 Argile ».
- [15] Avis de l’Autorité de sûreté nucléaire du 1er février 2006 sur les recherches relatives à la gestion des déchets à haute activité et à vie longue (HAVL) menées dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991, et liens avec le PNGDR-MV.
- [16] Rapport IRSN/2010-00002, Avis de l’Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire sur le « Dossier 2009 - Projet HA-MAVL » et sur le « DAIE ».
- [17] Avis CODEP-MEA-2010-068480, Avis et Recommandations du Groupe Permanent « Déchets » du 29/11/2010 - Dossier 2009 pour le projet HA-MAVL et demande de renouvellement de l’autorisation d’exploitation du laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne.
- [18] Avis ASN CODEP-DRC-2011-002092, Examen du « Dossier 2009 » relatif au projet HA-MAVL présenté devant le GPD les 29-30 novembre 2010.
- [19] Avis IRSN N° 2013-00159 du 26 avril 2013 sur les évolutions du projet Cigéo au stade « Jesq03 » depuis le Dossier 2009. <http://www.irsn.fr/FR/expertise/avis/Documents/AVIS-IRSN-2013-00159.pdf>
- [20] Lettre ASN CODEP-DRC-2013-033414 du 18 novembre 2013, Dossier « Projet Cigéo - Esquisse Jesq03 (2012) - Document de synthèse des évolutions par rapport au Dossier 2009 et impact sur la sûreté » .
- [21] Rapport IRSN N° 2014-00010 « Examen de la maîtrise des risques en exploitation au niveau esquisse du projet Cigéo », présenté devant le GPD et le GPU le 10 décembre 2014. http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/surete/IRSN-Rapport-2014-00067.pdf
- [22] Avis et recommandations CODEP-MEA-2014-056324 des Groupes Permanents « Déchets » et « Usines » du 10/12/2014 relatif au Projet de stockage Cigéo - Examen du dossier "maîtrise des risques en exploitation au niveau esquisse du projet Cigéo".
- [23] Lettre ASN CODEP-DRC-2015-004834 du 7 avril 2015 - Dossier « projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde - maîtrise des risques en exploitation au niveau esquisse du projet Cigéo ».
- [24] Avis DSU n° 2009-166 du 22 décembre 2009 sur le choix d’une zone d’intérêt pour la reconnaissance approfondie.

- [25] Lettre n°2010-AV-0084 du 5 janvier 2010 relative à la proposition d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation en surface pour un stockage réversible en formation géologique profonde.
- [26] Avis IRSN 2013-57 du 13 février 2013 - « Commentaires de l'Andra sur le rapport de l'IEER de mars 2011 ».
- [27] Rapport IRSN/IRSN 2013-00001, Projet Cigéo - Examen des études remises depuis 2009, présenté devant le GPD le 5 février 2013.
- [28] Avis et Recommandations du Groupe Permanent « Déchets » du 5 février 2013, « Avis relatif au projet de stockage CIGEO - Examen des études remises depuis 2009 ».
- [29] Avis n°2013-AV-179 du 16 mai 2013 de l'ASN sur les documents produits par l'Andra depuis 2009 relatifs au projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde.
- [30] Rapport IRSN N°2014-00006, « Projet de stockage Cigéo - Ouvrages de fermeture », présenté devant le GPD le 1er juillet 2014. http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_gp/Documents/Dechets/IRSN-GP_Cigeo-2014.pdf
- [31] Avis CODEP-MEA-2014-030920 du Groupe Permanent « Déchets » du 01/07/2014 relatif au projet de stockage Cigéo - Examen du dossier « Ouvrages de fermeture ».
- [32] Lettre ASN CODEP-DRC-2014-039040 du 9 octobre 2014 - Dossier « projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde – ouvrages de fermeture ».
- [33] Lettre IRSN DG/2014-00646 du 12 novembre 2014 - Transmission de l'avis sur le potentiel géothermique de la région de Bure.
- [34] Rapport IRSN RT/PRP-DGE/2014-00067 - « Potentiel géothermique du site de Meuse/Haute-Marne ». http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/surete/IRSN-Rapport-2014-00067.pdf
- [35] Note Andra CG.PDD.ADPC.14.0031 « Plan de développement des composants du projet Cigéo ».
- [36] Avis IRSN-0348 du 6 novembre 2015 « Plan de développement des composants du projet Cigéo » <http://www.irsn.fr/FR/expertise/avis/Documents/AVIS-IRSN-2015-00348.pdf>
- [37] Lettre ASN CODEP-DRC-2016-005220 du 20 juin 2016 - « Plan de développement des composants du projet Cigéo ».
- [38] Lettre Andra DG/16-0105 du 6 avril 2016.
- [39] Rapport Andra CG-TE-D-NTE-AMOA-SR1-0000-15-0060 - « Dossier d'options de sûreté - Partie exploitation » (DOS-Expl).
- [40] Rapport Andra CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-15-0062 - « Dossier d'options de sûreté – Partie après fermeture » (DOS-AF).
- [41] Rapport Andra CG-TE-D-NTE-AMOA-SRR-0000-15-0063 - Cigéo - « Proposition de plan directeur pour l'exploitation » (PDE).
- [42] Rapport Andra CG-TE-D-NTE-AMOA- RV0-0000-15-0059 - « Dossier d'options techniques de récupérabilité » (DORec).
- [43] Note Andra CG-TE-D-SPE-AMOA-SR0-7000-16-0005 - « Spécifications préliminaires d'acceptation des colis primaires à Cigéo ».
- [44] Note Andra CG-TE-D-NTE-AMOA-EX0-0000-16-0023 - Esquisse de la notice présentant les capacités techniques de l'exploitant de Cigéo « Réflexion sur la stratégie industrielle ».
- [45] Note Andra CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-16-0022 - « Glossaire des livrables CIGEO 2015 ».
- [46] Lettre Andra DG/16-0141 du 13 mai 2016.
- [47] Note Andra CRPADPG150013/A - « Adaptabilité de Cigéo pour le stockage de combustibles nucléaires usés ».
- [48] Note Andra CGNTADPG150006/A - « Adaptabilité de Cigéo pour le stockage des déchets en réserves.
- [49] Lettre ASN CODEP-DRC-2016-021729 du 16 juin 2016 - Projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde - Cigéo - Accusé de réception du dossier d'options de sûreté.
- [50] Note Andra CG-TE-D-SPE-AMOA-SR0-7000- 16-0063 - « Méthode d'élaboration des spécifications d'acceptation des colis primaires à Cigéo et Etat des lieux de la définition des exigences préliminaires ».
- [51] Note Andra CNTADPS150005 - « Utilisation des connaissances sur les colis primaires pour la conception et la démonstration de sûreté de Cigéo ».
- [52] Note Andra CGPEADPG110074.E, octobre 2016, « Programme industriel de gestion des déchets - Projet Cigéo ».
- [53] Rapport Andra D.RP.ASMG.12.0032.A, « Référentiel du site de Meuse/Haute-Marne ».
- [54] Rapport Andra D.RP.AMFS.12.0024.A, « Référentiel du comportement THM des formations sur le site de Meuse/Haute-Marne - Centre de Meuse/Haute-Marne ».
- [55] Note Andra CIGEO.SP.ADPG.11.0020.E, septembre 2013, « Exigences applicables - Projet Cigéo ».
- [56] Note Andra F.RP.OGTR.14.0004 - « Modèle structural régional et local révisé - Réalisation d'une base de données structurales et d'un atlas de fiches descriptives des structures tectoniques ».
- [57] Rocher M., De Hoyos A., Hibsich C., Viennot P., 2010. Geological investigations contributing to the hydrogeological conceptual model in the Meuse/Haute-Marne area, eastern France. "Nantes 2010" - Clays in

- Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement. (France), 29th March - 1st April 2010, p. 297, P/GEO/LS/07.
- [58] Note Andra CRPADSD090005 - « Modèle conceptuel du milieu géologique - Site de Meuse Haute Marne ».
- [59] Note Andra CGNTASMG130028 - « Résultats de la conversion temps profondeur de la sismique 3D Haute Résolution SZS ».
- [60] Note Andra DRPOSSQ120001 - « Optimisation de la conversion temps profondeur de la sismique 3D Haute Résolution SZS ».
- [61] Note Andra DRPOSSQ120002 - « Calculs d'incertitude sur les épaisseurs des couches converties en profondeur ».
- [62] Potentiel géothermique du site de Meuse/Haute-Marne. Fiche IRSN - http://www.irsn.fr/dechets/cigeo/Documents/Fiches-thematiques/IRSN_Debat-Public-Cigeo_Fiche-Geothermie.pdf
- [63] Evaluation de la présence d'hydrocarbures non conventionnels sur le secteur de Meuse/Haute-Marne. Rapport CG.NT.ASMG.13.0044.A.
- [64] Blaise T., Izart A., Michels R., Suarez-Ruiz I., Cathelineau M., Landrein P., 2011. Vertical and lateral changes in organic matter from the Mesozoic, eastern Paris Basin (France): Variability of sources and burial history. *International Journal of Coal Geology* 88 (2011) 163-178.
- [65] Blaise T., 2012. Histoire thermique et interactions fluides roches dans l'Est du Bassin de Paris. Thèse Université de Lorraine, 348 p.
- [66] Note Andra CG. NT.AGES.16.0002 - « Modèle conceptuel de l'évolution du site de Meuse/Haute-Marne au cours du prochain million d'années ».
- [67] Note Andra C.RP.0ARM.12.0002. Surrection tectonique dans le Bassin de Paris ». Volume 1 : texte ; volume 2 : figures.
- [68] Note Andra C RP 0ARM 07 0001 A - « Estimation du taux de surrection régionale et de sa variabilité spatiale et temporelle à l'échelle du bassin de Paris ».
- [69] Note Andra C.RP.0GTR.08.0001/A - « Etude de la faille de Vittel - Recherche et analyse de traces d'activité récente ».
- [70] Note Andra C.RP.0GTR.11.0001 - « Estimation des vitesses possibles de glissement des failles de l'est du bassin de Paris ».
- [71] Linard Y., Vinsot A., Vincent B., Delay J., Wechner S., De La Vaissière R., Scholz E., Garry B., Lundy M., Cruchaudet M., Dewonck S., Vigneron G., 2011. Water flow in the Oxfordian and Dogger limestone around the Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory. *Physics and Chemistry of the Earth* vol. 36, issue 17-18, pp. 1450-1468.
- [72] Note Andra D.RP.ALS.08.1356/B - « Synthèse du programme de reconnaissance de la zone de transposition 2007-2008. Centre de Meuse/Haute-Marne ».
- [73] Note Andra D RP ASMG 11 0102 « Synthèse hydrogéologique du Barrois ».
- [74] Note Andra D.RP.AGES.15.0033, 2011 -« Projet Cigéo - Expérimentation MHS - Bilan 2012, 2013, 2014 des mesures hydrogéologiques et hydrologiques de surface » - Tome 1, Tome 2
- [75] Note Andra C.RP.0GRU.09.0002 « Variation spatiale des débits des cours d'eau dans la région Meuse/Haute-Marne » (2009) - Volume 1 - Acquisition de données ; 2 - Modèle conceptuel
- [76] Carpentier C., 2004. Géométrie et environnements de dépôt de l'Oxfordien de l'Est du Bassin de Paris. Thèse Doct. Univ. H. Poincaré, Nancy-I, 471 p.
- [77] Lavastre V., Le Gal La Salle C., Benedetti L., Michelot J-L., Giannesini S., Massault M., Thomas B., Gilabert E., Lavielle B., Bourlès D., Lancelot J., 2010. Establishing constraints on groundwater ages with ³⁶Cl, ¹⁴C, ³H, and noble gases: a case study in the eastern Paris Basin, France. *Appl. Geochem.* 25, 123-142.
- [78] Yu C., Matray J.-M., Gonçalves J., Jaeggi D., Gräsele W., Wiczorek K., Vogt T., Sykes E. (submitted to the *Swiss Journal of Geosciences*, to be published in 2017). Comparative study of methods to estimate hydraulic parameters in the hydraulically undisturbed Opalinus Clay at the Mont Terri rock laboratory (DB Experiment)
- [79] AF Consult, 2017, DB Experiment: Analysis of hydraulic tests carried out in the 7 intervals of the BDB-1 borehole, Mont Terri Technical Note TN2017-05.
- [80] Note Andra CGNTAEAP160002 - « Evaluation de l'évolution du gradient vertical de charge hydraulique dans le Callovo- Oxfordien à l'actuel et sur le prochain million d'années ».
- [81] Note Andra CGNTAEAP120084 - « Evaluation de l'effet de la surpression hydraulique naturelle dans la couche du Callovo-Oxfordien sur la performance post-fermeture du stockage Cigéo pour la voie de transfert par l'eau dans le Callovo-Oxfordien, en fonctionnement normal ».
- [82] Gonçalves J., De Marsily G. and Tremosa J., 2012. « Importance of thermo-osmosis for fluid flow and transport in clay formations hosting a nuclear waste repository ». *Earth and Planetary Science Letters*, 339-340, 1-10.

- [83] Note Andra CGNTASTR120003 B - « Référentiel de comportement des radionucléides et des toxiques chimiques dans le contexte du projet Cigéo ».
- [84] Note Andra CGRPASCM120014 - « Référentiel des matériaux d'un stockage de déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue » - Tome 2 : les matériaux cimentaires.
- [85] Note Andra CGNTADIP130001 - « Retour d'expérience de la construction et de l'exploitation du Laboratoire souterrain et des expérimentations de 2000 à 2012 - Centre de Meuse/Haute-Marne ».
- [86] de Hoyos A., Viennot P., Ledoux E., Matray J.-M., Certes C., Rocher M., 2010. Thermohaline Modeling of the Paris Basin Hydrogeological Model. *Journal of Hydrology*, 464-465, p. 12-26.
- [87] Mayor J.-C., Velasco M., García-Siñeriz J.-L., 2007. Ventilation experiment in the Mont Terri underground laboratory. *Physics and Chemistry of the Earth*, 32, p. 616-628.
- [88] Note Andra CGNTAEAP160001 - « Projet CIGEO - Synthèse des modélisations hydrogéologiques (2007-2014) du site de Meuse/Haute-Marne - Le modèle hydrogéologique à l'Actuel et son évolution sur le prochain million d'années ».
- [89] Note Andra CG.NT.ASCM.16.0009 - « Comportement des déchets en stockage - Modèles de relâchement des radionucléides ».
- [90] Note Andra CGNTASCM130021 - « Comportement des déchets en stockage - Modèles de relâchement des radionucléides pour les différentes familles de colis ».
- [91] Note Andra SUR.NT.ASAF.14.0024 - « Modèles de relâchement retenus pour les déchets HA et les déchets MAVL vitrifiés pour les évaluations de sûreté après fermeture de Cigéo »
- [92] Note Andra SUR.NT.ASAF.14.0003 - « Modèles de relâchement retenus pour les déchets MAVL pour les évaluations de sûreté après fermeture de Cigéo ».
- [93] Note Andra CGRPPEAP150006 - « Simulations de l'évolution chimique des alvéoles de déchets bitumineux »
- [94] Note Andra CGRPFSCM150027 - Corrosion généralisée des aciers au carbone en conditions représentatives du stockage. Bilan des essais de corrosion en milieux argileux effectués par l'Andra et ses partenaires
- [95] Note Andra CGNTAEAP150034 - « La charge thermique de la zone HA pour l'architecture Japs03b : hypothèses, données d'entrée et indicateurs thermiques ».
- [96] Note Andra CG.NT.ADPG.13.0026 - « Incidence des vides dans les tunnels de stockage sur la propagation de l'EDZ à long terme - Projet Cigéo ».
- [97] Note SUR.NT.ASSE.16-0016 - « Démarche d'analyse de sûreté en phase d'exploitation pour les installations nucléaires de l'Andra ».
- [98] Note Andra CG-TE-F-NTE-AMOA-SR1-0000-13-0071/A - « Référentiel de sûreté appliqué à la conception de Cigéo pour la phase d'exploitation »
- [99] RFS 2001-01
- [100] Note Andra C.NT.ASSE.16.0021 - « Synthèse des données associées aux calculs de criticité en support aux livrables Cigéo-2015- Colis HA, MAVL et combustibles nucléaires usés ».
- [101] Note Andra SUR NT ASSN 11.0051 indice D, novembre 2014, « Référentiel incendie pour la conception de Cigéo ».
- [102] Note Andra CGTEDNSYAMOASR10000140116 - « Programme Bitume - Synthèse des essais d'incendie réel sur un colis de stockage MAVL dans sa configuration de stockage ».
- [103] Note Andra CGTEDNSYAMOASR10000140118 - « Programme bitume - Synthèse des résultats des trois essais thermiques sur les colis de stockage B2.1 d'enrobés bitumineux ».
- [104] Lettre Andra n° DRD/DIR/15-0004 - Envoi de documents : Dossier bitume - Andra (2015) (cf. notamment références 102, 103, 179, 180, 181, 182, 183, 195, 236, 237, 238).
- [105] Note Andra CG-TE-D-SPE-IPOM-MC0-8000-14-0015-A1 - « Système de transfert incliné (funiculaire), Dossier Définition Sommaire ».
- [106] Note Andra SURNTASSEI 40002 - « Référentiel technique applicable à la conception, la réalisation et l'exploitation d'un système de transfert incliné de colis de déchets radioactifs ».
- [107] Annexe à la Lettre DISEF /DIR/16-0209 « Evaluation préliminaire des possibilités d'interception d'un réseau de conduits karstiques du Barrois par les ouvrages de liaison surface/fond du stockage Cigéo »
- [108] Note Andra CGRPFGES160065 « Réévaluation de l'aléa sismique pour les futures implantations du projet Cigéo - Approches déterministe et probabiliste ».
- [109] Note Andra CG. NT.AGES.16.0032 - « Réévaluation de l'aléa sismique à 2016 pour les futures implantations du projet Cigéo par approche déterministe et approche probabiliste ».
- [110] Nocquet J.-M., Sue C., Walpersdorf A., Tran T., Lenôtre N., Vernant P., Cushing M., Jouanne F., Masson F., Baize S., Chéry J., van der Beek P.A., 2016. Present-day uplift of the western Alps. *Scientific reports* 6, 28404.
- [111] Zoback M., Grollimund B., 2001. Impact of deglaciation on present-day intraplate seismicity in eastern North America and western Europe. *C. R. Acad. Sci. Paris, Earth and Planetary Sciences*, 333, p. 23-33.

- [112] Andra (2005). Aléa sismique : consolidation de l'approche déterministe, essai préliminaire d'une approche probabiliste. Site Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.RP.0GTR.04.0013.A.
- [113] Note Andra C.RP.0GTR.09.0001/A - « Estimation de la variabilité spatiale des mouvements sismiques sur la zone de transposition. Secteur de Meuse/Haute Marne ».
- [114] Note Andra SURNTASSC140005 - « Valeurs toxicologiques de référence (VTR) retenues par l'Andra pour les toxiques chimiques pris en compte par l'Andra dans ses évaluations d'impact ».
- [115] Note Andra SURNTASAF140018/B - « Inventaire radiologique pour l'évaluation de sûreté après fermeture de Cigéo ».
- [116] Note Andra CGNTADSD130027 - « Projet Cigéo : Revues techniques de préparation à la Demande d'Autorisation de Création (DAC) Revue Finale des Modèles et des Données - première partie (RFMD-1) : Bilan des connaissances phénoménologiques et incertitudes résiduelles ».
- [117] Note Andra CGNTAEAP160005 - « Estimation des débits d'eau pompables dans les formations aquifères encaissantes du Callovo-Oxfordien ».
- [118] Note Andra CGNTAEAP150042 - Dossier d'Options de Sûreté en Après-Fermeture (DOS-AF) - « Evaluation quantitative du Scénario d'Evolution Normale (SEN) - Hypothèses, données et résultats ».
- [119] Note Andra CGNTAEAP150044 - Dossier d'Options de Sûreté en Après-Fermeture (DOS-AF) - « Evaluation quantitative des scénarios SEA et What-if de dysfonctionnement des ouvrages de fermeture - Hypothèses, données et résultats ».
- [120] Note Andra CGNTAEAP150047 - Dossier d'Options de Sûreté en Après-Fermeture (DOS-AF) - « Evaluation quantitative des scénarios SEA et What-if de défaillance des conteneurs de stockage HA - Hypothèses, données et résultats ».
- [121] Note Andra CGNTAEAP130050 - « Transfert par la voie ouvrages - Influence des éléments d'architecture et de conception du stockage Cigéo vis-à-vis de son évolution phénoménologique et de sa performance après fermeture ».
- [122] Note Andra CG.NT.AEAP.16.0011 - « Evaluation de l'influence d'éléments d'architecture de l'installation fond sur la performance en après-fermeture du système de stockage »
- [123] Note Andra CG-TE-D-NTE-AMOA-ASU-0000- 16-0067 - « Justification de l'architecture souterraine du stockage au stade de l'APS- Projet Cigéo »
- [124] Rapport AIEA, IAEA-BIOMASS-6, « Reference Biosphere » for solid radioactive waste disposal, de juillet 2003.
- [125] Guide INERIS, Évaluation des risques sanitaires dans les études d'impact des ICPE - substances chimiques, 2003.
- [126] Guide INERIS, Évaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires, 2013.
- [127] Ouvrage d'André LANNOY de 1984, édition EDF - bulletin de la direction des études et recherches - série A : « Analyse des explosions air-hydrocarbure en milieu libre - analyse déterministe et probabiliste du scénario d'accident ».
- [128] Arrêté du 2 décembre 2016 modifiant l'arrêté du 29 mai relatif aux transports de marchandises dangereuses par voie terrestre, dit « arrêté TMD »
- [129] Rapport IRSN FT/AV/PSN/2015-00218 : « Analyse approfondie de l'événement de Penly 2 du 5 avril 2012 concernant le repli dans le chapitre VI des RGE à la suite d'un début d'incendie du groupe motopompe primaire RCP 051 PO (GMPP n° 1) ayant entraîné un arrêt automatique du réacteur », établi en support à l'avis IRSN/2015-00416 du 18 décembre 2015.
- [130] Note Andra CGTEDNTEAMOASR10000130127 du 6 décembre 2013 : « La maîtrise des risques de dissémination de substances radioactives, d'explosion lié à l'émission d'hydrogène par les colis de déchets, d'incendie et des risques liés à la coactivité dans l'installation souterraine et les liaisons surface-fond de Cigéo au stade de l'esquisse ».
- [131] SURGUASSN09-0022 Ind. B du 20 juillet 2016 - « Méthodologie pour la conception et le dimensionnement des moyens de protection ».
- [132] Arrêté du 22 juillet 2004 relatif aux modalités de gestion du risque lié au radon dans les lieux ouverts au public.
- [133] Arrêté du 7 août 2008 relatif à la gestion du risque lié au radon dans les lieux de travail.
- [134] Arrêté du 15 mai 2006 relatif aux conditions de délimitation et de signalisation des zones surveillées et contrôlées et des zones spécialement réglementées ou interdites compte tenu de l'exposition aux rayonnements ionisants, ainsi qu'aux règles d'hygiène, de sécurité et d'entretien qui y sont imposées.
- [135] Note de synthèse de l'IRSN du 2 avril 2014 - Réflexion de l'IRSN sur les grandes étapes de la démonstration de la sûreté du projet Cigéo et des modalités d'expertise associées. http://www.irsn.fr/dechets/actualite/Documents%20partages/IRSN_Reflexion-demonstration-surete-cigeo_02042014.pdf

- [136] Note Andra D.RP.OG2R.00.003/A - « Site de Meuse/Haute-Marne. Cartographie géologique et structurale de l'environnement régional du site » (3 Volumes).
- [137] Note Andra C.RP.1.GTR.03.001/B - « Site de Meuse/Haute-Marne. Complément du modèle structural de secteur. Complément à l'interprétation des profils sismiques 2D, interprétation des 6 nouveaux profils sismiques et conversion temps/profondeur ».
- [138] Note Andra CRP.ADP.09.0035/A - « Stockage réversible profond. Proposition d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation en surface »
- [139] Décret n°2007-1557 du 2 novembre 2007 relatif aux installations nucléaires de base et au contrôle, en matière de sûreté nucléaire, du transport de substances radioactives.
- [140] Avis n°2011-AV-129 du 26 juillet 2011 de l'Autorité de sûreté nucléaire sur le dossier relatif au stockage réversible profond des déchets de haute et moyenne activité à vie longue déposé par l'Andra conformément à l'article 11 du décret n°2008-357 du 16 avril 2008.
- [141] Stchépinsky M.V., 1965. Carte géologique de la France, feuille de Doulaincourt, notice explicative de la carte géologique à 1/50 000, BRGM, Orléans.
- [142] Avis n°2016-AV-264 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 29 mars 2016 sur les études relatives à la gestion des déchets de faible activité à vie longue (FA-VL) remises en application du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2013-2015, en vue de l'élaboration du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2016-2018.
- [143] Wells D. L. & Coppersmith K.J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of Seismological Society of America*, vol. 84 no. 4, p. 974-1002.
- [144] Calais E., Camelbeeck T., Stein S., Liu M., Craig T. J., 2016. A new paradigm for large earthquakes in stable continental plate interiors. *Geophysical Research Letters Frontier Paper*.
- [145] Stucki J.W. & Kostka J.E., 2006. Microbial reduction of iron in smectite. *Comptes Rendus Geoscience*, vol. 338, 6-7, p. 468-475.
- [146] Esnault L., Libert M., Bildstein O., Mustin C., Marsal F., Jullien M., 2013 Impact of iron-reducing bacteria on the properties of argillites in the context of radioactive waste geological disposal. *Applied Clay Science*, vol. 83-84, p. 42-49.
- [147] Avis n° 2015-AV-0227 de l'ASN du 10 février 2015 relatif à l'évaluation des coûts afférents au projet Cigéo de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde.
- [148] Lavastre V., Jendrzewski N., Agrinier P., Javoy M., Evrard, M., 2005. Chlorine transfer out of a very low permeability clay sequence (Paris Basin, France): 35Cl and 37Cl evidence. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 69 (21), 4949-4961.
- [149] Mazurek M., Alt-Epping P., Bath A., Gimmi T., Waber H.N, 2008. CLAYTRAC Project Natural Tracer Profiles Across Argillaceous Formations Review and Synthesis. Rapport OCDE - NEA No. 6253.
- [150] Fourré E., Jean-Baptiste P., Dapoigny A., Lavielle B., Smith T., Thomas B., Vinsot A., 2011. Dissolved helium distribution in the Oxfordian and Dogger deep aquifers of the Meuse/Haute-Marne area; *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 36, 17-18, pp. 1511-1520.
- [151] Rebeix R., Giannesini S., Le Gal La Salle C., Michelot J.L., Verdoux P., Noret A., Monvoisin G., Lancelot J., 2011. Tracing the origin of water and solute transfers in deep groundwater from Oxfordian, Dogger and Trias formations in the east of the Paris Basin - France. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36, 1496-1510.
- [152] Rebeix R., Le Gal La Salle C., Jean-Baptiste P., Lavastre V., Fourré E., Bensenouci F., Matray J.M., Landrein P., Shouakar-Stash O., Frape S.K., Michelot J.L., Lancelot J., 2014. Chlorine transport processes through a 2000 m aquifer/aquitard system. *Mar. Pet. Geol.*, 53, 102-116.
- [153] Bensenouci F., Michelot J.L., Matray J.M., Savoye S., Lavielle B., Thomas B., Dick P., 2011. A profile of helium-4 concentration in pore-water for assessing the transport phenomena through an argillaceous formation (Tournemire, France). *Physics and Chemistry of the Earth*, 36, 1521-1530.
- [154] Bensenouci F., Michelot J.L., Matray J.M., Savoye S., Massault M., Vinsot A., 2014. Coupled study of water-stable isotopes and anions in porewater for characterizing aqueous transport through the Mesozoic sedimentary series in the eastern Paris Basin *Marine and Petroleum Geology*, 53, 88-101.
- [155] Battani A., Smith T., Robinet J.C., Brulhet J., Lavielle B., Coelho D., 2011. Contribution of logging tools to understanding helium porewater data across the Mesozoic sequence of the East of the ParisBasin ; *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 75, pp. 7566-7584.
- [156] Dauzères A., Le Bescop P., Sardini P., Cau Dit Coumes C., Physico-chemical investigation of clayey/cement-based materials interaction in the context of geological waste disposal: Experimental approach and results, *Cement and Concrete Research*, 40 (2010) 1327-1340.
- [157] Dauzères A., Etude expérimentale et modélisation des mécanismes physico-chimiques des interactions béton-argile dans le contexte du stockage géologique des déchets radioactifs, Thèse de l'Université de Poitiers, 2010, 249p.

- [158] Dauzères A., Le Bescop P., Cau-Dit-Coumes C., Brunet F., Bourbon X., Timonen J., Voutilainen M., Chomat L. and Sardini P., On the physico-chemical evolution of low-pH and CEM I cement pastes interacting with Callovo-Oxfordian pore water under its in situ CO₂ partial pressure, *Cement and Concrete Research*, 58 (2014) 76-88.
- [159] Lalan P., Influence d'une température de 70°C sur la géochimie, la microstructure et la diffusion aux interfaces béton/argile : expérimentations en laboratoire, in situ et modélisation, thèse de doctorat, 2016, 168p.
- [160] Auroy M., Impact de la carbonatation sur les propriétés de transport d'eau des matériaux cimentaires, thèse de doctorat, 2014, 250p.
- [161] Note Andra CGPEADPG110074.A, janvier 2012, « Programme industriel de gestion des déchets - Projet Cigéo ».
- [162] Note Andra CGPEADPG110074.D, juillet 2014, « Programme industriel de gestion des déchets - Projet Cigéo »
- [163] Note ZSPADP070019 indice A du 15/10/2007 - Projets RG (Radifères-Graphites) et HAVL (Haute Activité et Vie Longue), Constitution des dossiers de connaissances des familles de déchets conditionnés ou non.
- [164] Décret n° 2016-1442 du 27/10/2016 relatif à la programmation pluriannuelle de l'énergie (JORF n° 0252 du 28 octobre 2016, texte n° 3).
- [165] Lettre CODEP-DCN-2016-007286 du 20/04/2016.
- [166] Décret n° 2001-1220 du 20/12/2001 relatif aux eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux minérales naturelles (JORF n° 297 du 22/12/2001, page 20381, texte n° 15).
- [167] Arrêté du 18/12/1992 relatif au stockage de certains déchets industriels spéciaux ultimes et stabilisés pour les installations nouvelles (NOR : ENVP9250386A).
- [168] Décision n° 2014-DC-0402 de l'ASN du 21 janvier 2014 - Centrale nucléaire de Dampierre-en-Burly.
- [169] Arrêté du 30/12/2002 relatif au stockage de déchets dangereux (NOR : DEVPO320005A, version consolidée au 27/01/2017).
- [170] Rapport IRSN/DES n° 393 « Avis de l'IPSN sur le référentiel géologique du site de Bure (Département de la Meuse) », présenté le 11 janvier 2000.
- [171] EIA/ARI World Shale Gas and Shale Oil Resource Assessment, Advanced Res. Int., Inc. ; June 2013, 707 p.
- [172] Note Andra CG.RP.ASCM.12.0026, ind. A - Référentiel du comportement des colis de déchets HA-MAVL.
- [173] Frugier P., Gin S., Minet Y., Chave T., Bonin B., Godon N., Lartigue J.E., Jollivet P., Ayrat A., De Windt L. & Santarini G., 2008. SON68 Nuclear glass dissolution kinetics: current state of knowledge and basis of the new GRAAL model. *Journal of Nuclear Materials*, 380, (1-3), 8-21.
- [174] Hellmann R., Cotte S., Cadel E., Malladi S., S. Karlsson L., Lozano-Perez S., Cabié M., & Seyeux A., 2015. Nanometre-scale evidence for interfacial dissolution-reprecipitation control of silicate glass corrosion. *Nature materials*, 05/01/2015, DOI:10.1038/NMAT4172.
- [175] Devos A., 1996 - « Hydrologie et aménagements hydrauliques de la Saulx et de l'Ornain (Lorraine) ». Thèse de doctorat de l'Université de Metz.
- [176] Avis IRSN N° 2014-00394 du 03 novembre 2014 : AREVA NC - Etablissement de La Hague - Colis standard de déchets vitrifiés CSD-B - Spécification 300 AQ 61.
- [177] Avis IRSN N° 2015-00295 du 21 septembre 2015 : PNGMDR - Inventaires des matières organiques et complexants dans les colis de déchets MA-VL.
- [178] Castelotte M., Fernandez L., Andrade C., Alonso C., Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO₂ concentrations, *Materials and Structures*, 42 : (2009) 515-525.
- [179] Note CEA/AREVA/CORIA DEN/DANS/SP2S/NT/14-016/A - « Bilan des 8 essais de tenue au feu d'enrobés de boues bitumées à l'échelle du kg (Campagne d'essais 2013) ».
- [180] Document CEA/AREVA DEN/DANS/SP2S/NT/14-035-A - « Comportement en température des colis d'enrobés de boues bitumées ».
- [181] Note EDF H-I83-2014-05164-FR 1.0 - « Modélisation du comportement en température d'échantillons de boues bitumées à l'aide du logiciel SYRTHES ».
- [182] Note CEA/AREVA DPAD/CMDT/NT/2014-012 ind. 0 - « Plan d'expérience pour l'étude de la réactivité thermique des enrobés STE La Hague (STE2/STE3) et STEL Marcoule (Période 3/4). Interprétation des résultats expérimentaux ».
- [183] Note CEA/AREVA DPAD/CMDT/EXUFU/NT/2014-11, ind.0 - « Construction des plans d'expériences pour l'étude de la réactivité thermique des enrobés bitumineux STEL Marcoule et STE La Hague ».
- [184] Note Andra C.RP.ASOS.11-0119.B, Décembre 2011 - « Bilan pluriannuel de la qualité des milieux. Observatoire Pérenne de l'Environnement (OPE) 2009/2010 ».
- [185] Guide n° 13 de l'ASN - Protection des installations nucléaires de base contre les inondations externes.

<https://professionnels.asn.fr/Installations-nucleaires/Centrales-nucleaires/Guides-de-l-ASN-dans-le-domaine-des-installations-nucleaires/Guide-de-l-ASN-n-13-Protection-des-installations-nucleaires-de-base-contre-les-inondations-externes>

- [186] Rapport IRSN du 13 novembre 2013, « L'aléa inondation - État de l'art préalable à l'élaboration du guide inondation pour les installations nucléaires ».
http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/surete/Pages/Alea-inondation-etat-de-l-art_2013.aspx#.WMKfb6PLS70
- [187] Poinsot & Geckeis, 2012. Radionuclide Behaviour in the Natural Environment: Science, Implications and Lessons for the nuclear industry.
- [188] De Cannière P., Maes A., Williams S., Bruggeman C., Beauwens T., Maes N., Cowper M., 2010. Behaviour of Selenium in Boom Clay. External Report, SCK•CEN-ER-120, 10/PDC/P-9.
- [189] Bruggeman C., Maes A., Vancluysen J., 2007. The interaction of dissolved Boom clay and Gorleben humic substances with selenium oxyanions (selenite and selenate), Applied Geochemistry 22.
- [190] Gimmi T., Leupin O., Eikenberg J., Glaus M., Van Loon L., Waber H., Wersin P., Wang H.A.O, Grolimund D., Borca C., Dewonck S., Wittebroodt C., 2014. Anisotropic diffusion at the field scale in a 4-year multi-tracer diffusion and retention experiment - I : Insights from the experimental data, Geochimica et Cosmochimica Acta 125.
- [191] Lettre ASN DSIN-FAR/SD3/N° 50645/01 du 27 janvier 2001 - Etablissement COGEMA de La Hague. Spécification du colis standard de déchets compactés.
- [192] Lettre ASN CODEP-DCN-2016-007286 du 20 avril 2016 : Orientations génériques du réexamen périodique associé aux quatrième visites décennales des réacteurs de 900MWe d'EDF (VD4-900).
- [193] Décision n°2014-DC-0464 de l'ASN du 30 octobre 2014 fixant à AREVA NC diverses prescriptions relatives au conditionnement des déchets technologiques contenant des matières organiques et irradiants ou riches en éléments émetteurs alpha dits déchets technologiques non susceptibles d'être stockés en surface (N3S) produits et entreposés dans l'INB n°151 dénommée Mélox dans la commune de Chusclan (Gard) et dans l'établissement de La Hague dans la commune de Beaumont-Hague (Manche).
- [194] Note Andra D RP ASMG 11 0044 « La formation du Barrois - Etat des connaissances et apport des reconnaissances 2010 sur la ZIRA » (2011).
- [195] Note Andra CG.NT.AEAP.14-0052, ind.A - « Evaluation préliminaire de l'impact de la pression de gonflement des boues bitumées du fait de la reprise d'eau sur le comportement mécanique des argilites du Callovo-oxfordien en champ proche des alvéoles MAVL ».
- [196] Avis IRSN n°2017-00080 du 22 mars 2017 : Spécification de production du colis substitutif au bitumage pour le conditionnement des boues STE2, dénommé colis C5, acceptabilité au stockageDSU/2009-130 du 15 octobre 2009 : AREVA NC - Colis C5 - colis alternatif au colis « bitume ».
- [197] Rapport IRSN n°2017-00004 : Reprise et conditionnement des silos STE2 de l'établissement AREVA NC La Hague - Spécifications de production du colis C5 et acceptabilité en stockage géologique.
- [198] Avis du groupe permanent Usines du 19/11/2008 relatif à l'examen de la révision du rapport préliminaire de sûreté de l'installation ICEDA (EDF) (Lettre GPU - DEP-MJO-0168-2008 du 19 décembre 2008).
- [199] Lalan P., Dauzères A., De Windt L., Bartier D., Sammaljärvi J., Barnichon J.-D., Techer I., Detilleux V., 2016. Impact of a 70 °C temperature on an ordinary Portland cement paste/claystone interface: An in situ experiment. Cement and Concrete Research, vol. 83, May 2016, p. 164-178.
- [200] Mariën A., Mokni N., Valcke E., Olivella S., Smets S., Li X., 2013. Osmosis-induced water uptake by Eurobitum bituminized radioactive waste and pressure development in constant volume conditions, Journal of Nuclear Materials, 432, p. 348-365.
- [201] Avis IRSN n°2016-00141 du 29 avril 2016. Etablissement AREVA NC de La Hague - INB n°118 - Atelier STE3 - Déchets alpha - Etude préliminaire du « procédé d'incinération vitrification in can » (PIVIC).
- [202] Avis IRSN N°2015-00328 du 14 octobre 2015. Etude transmise dans le cadre du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs - recommandations pour la conception d'installations d'entreposage s'inscrivant dans la complémentarité avec le stockage.
- [203] A. Vinsot, C. A. J. Appelo, M. Lundy, S. Wechner, Y. Lettry, C. Lerouge, A. M. Fernandez, M. Labat, C. Tournassat, P. De Canniere, B. Schwyn, J. Mckelvie, S. Dewonck, P. Bossart and J. Delay, 2014 : In situ diffusion test of hydrogen gas in the Opalinus Clay, Geological Society, London, Special Publications, 400, first published on April 2, 2014, doi:10.1144/SP400.12.
- [204] E. Jacobs, K. Wouters, G. Volckaert, H. Moors, N. Maes, C. Bruggeman, R. Swennen, R. Littke, 2015 : Measuring the effective diffusion coefficient of dissolved hydrogen in saturated Boom Clay, Applied Geochemistry 61 (2015) 175-184.
- [205] A. Lassin, M. Parmentier, L. Andre, M. Pettenati, J. Tremosa, M.A. Sbai, N. Devau, M. Dymitrowska, 2012 : Impact of H2 production on the chemical reactivity of partially saturated argillites: towards simulations of

- scenarios, Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement - 5 International meeting Book of abstracts (2012) 923p, France.
- [206] IAEA GEOSAF Part II Project - The International Intercomparison and Harmonisation Project on Demonstrating the Safety of Geological Disposal. <http://www-ns.iaea.org/projects/geosaf/>
- [207] IAEA Safety Standards, Specific safety Guide No. SSG-14, Geological disposal for radioactive waste. http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1483_web.pdf
- [208] Directive 2013/59/Euratom du Conseil du 5 décembre 2013, fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants et abrogeant les directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom et 2003/122/Euratom, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32013L0059>
- [209] Arrêté du 12 avril 2006 modifiant l'arrêté du 1er juin 2001 modifié relatif au transport des marchandises dangereuses par route (dit « arrêté ADR »). <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000639008&dateTexte=&categorieLien=id>
- [210] Plan A0 Andra, CG-TE-D-PLA-SCVG-AF0-4000-14-005 - Architecture générale - Plan d'ensemble à terminaison des liaisons surface-fond et des installations au fond géo-localisées.
- [211] Rapport AEN n°6184, 2010. Self-sealing of fractures in argillaceous formations in the context of geological disposal of radioactive waste. <https://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2010/nea6184-self-sealing.pdf>
- [212] de La Vaissière R., Armand G. and Talandier J., 2014. Excavation damaged zone under imbibition: evidence of self-sealing into claystone. *Unsaturated Soils: Research & Applications*, Sidney (Australia), Taylor & Francis group.
- [213] Note Andra C.NT.AHVL.00-012, 06/03/00 - « Apports des acquisitions en Laboratoire de recherche souterrain à l'étude des puits d'une éventuelle installation de stockage de déchets HAVL ».
- [214] Jacob C.E. & Lohman S.W., 1952. Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer. *Trans. AGU* 33, p. 559-569.
- [215] Rapport IRSN DES N°408 - « Avis de l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire sur la maîtrise de l'impact du laboratoire souterrain et sur le programme d'investigation avant et pendant le fonçage des puits - Site de Bure (Département de la Meuse) », présenté devant le groupe permanent chargé des installations destinées au stockage à long terme des déchets radioactifs le 5 juillet 2000.
- [216] Note Andra C.RP.ASCM.04.0015.B, Dossier 2005 - « Référentiel des matériaux d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue ».
- [217] projet FORGE, Fate Of Repository Gases – D3.38-R, « Experiments and modelling on the behaviour of EBS », <https://www.bgs.ac.uk/forge/docs/reports/D3.38-R.pdf>
- [218] Bingham P.A., Connelly A.J., Cassingham N.J. and Hyatt N.C. 2011, Oxidation state and local environment in alkali borosilicate glasses for radioactive waste immobilisation, *Journal of non-crystalline Solids*, 2011, Volume 357, Issue 14.
- [219] Courrier CEA/DEN/MAR/DTCD/SECM/LDMC DO 92 11KKCD000092 du 15/12/2011 - « Avis sur l'état rédox du sélénium dans les verres de PF ».
- [220] Document Andra CC.NT.ASTR.15.0025 - « Bilan des études de R&D en lien avec l'acceptation du colis C5 en stockage profond Cigéo ».
- [221] Stammose, D., Osmond, M., Barker, E., Wittebroodt, C., 2014. Hydrogen production by iron corrosion under gamma-irradiation. *Eurocorr2014*.
- [222] El Hajj H., Abdelouas A., Grambow B., Martin C., Dion M., 2010. Microbial corrosion of P235GH steel under geological conditions. *Physics and Chemistry of the Earth* 35, 248-253.
- [223] AlAbbas F.M., Williamson C., Bholra S.M., Spear J.R., Olson D.L., Mishra B., Kakpovbia A.E., 2013. Influence of sulfate reducing bacterial biofilm on corrosion behavior of low-alloy, high-strength steel (API-5L X80). *International Biodeterioration & Biodegradation* 78, 34-42.
- [224] Ashassi-Sorkhabi H., Moradi-Haghighi M., Zarrini G., Javaherdashti R., 2012. Corrosion behavior of carbon steel in the presence of two novel iron-oxidizing bacteria isolated from sewage treatment plants. *Biodegradation* 23, 69-79.
- [225] Videla H.A., 1996. Corrosion inhibition by bacteria. In: *Manual of Biocorrosion*. CRC Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 121-135.
- [226] Schütz M.K., Moreira R., Bildstein O., Lartigue J.E., Schlegel M.L., Tribollet B., Vivier V., Libert M., 2014. Combined geochemical and electrochemical methodology to quantify corrosion of carbon steel by bacteria activity. *Bioelectrochemistry* 97, 61-68.
- [227] Urios L., Marsal F., Pellegrini D. and Magot M., 2012. Microbial diversity of the 180 million-year-old Toarcian argillite from Tournemire, France. *Applied Geochemistry*, vol. 27, issue 7, 1442-1450
- [228] Document Andra Cigeo.NT.ASGP.11.0004/A, juillet 2011, « Prise en compte des facteurs organisationnels et Humains (FOH) dans les projets Andra ».

- [229] Note Andra CIGEO.SP.ASGP.11.0002 ind. B du 5 janvier 2012 - « Spécifications de management de la Maitrise d’Œuvre Système ».
- [230] Note Andra CG-TE-D-NTE-AMOA-EX0-0000-15-00007 ind. B du 16 novembre 2015 - « Principes préliminaires et modalités d’exploitation de Cigéo - Vision exploitation ».
- [231] Note GAIYA CG-TE-D-NTE-TGYA-XEE-0000-16-0012 ind. A du 29 septembre 2016 - « Doctrine d’Exploitation »
- [232] Arrêté du 23/02/2017 pris en application du décret n°2017-231 du 23 février 2017 pris pour application de l’article L.542-1-2 du code de l’environnement et établissant les prescriptions du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs.
- [233] Décision ASN n°2008-DC-0110 de l’ASN homologuée par arrêté du 8 décembre 2008.
- [234] Décision ASN n° 2014-DC-0417 du 28 janvier 2014 relative aux règles applicables aux installations nucléaires de base (INB) pour la maîtrise des risques liés à l’incendie.
- [235] Note GAIYA CG-TE-F-TGYA-EFH-0000-12-0001/02 ind. A du 11 juin 2012 - « Plan de management FOH ».
- [236] Note de synthèse sur les résultats du programme d’étude conjointe Andra/AREVA/CEA/EDF sur les enrobés bitumineux - Note du 24/12/2014.
- [237] Note CEA DEN/MAR/DTCD/SPDE/NT 2014/DO n°23/indice A, 2014 - « Etude de la variabilité de la composition chimique des enrobés bitumineux sur le comportement thermique : méthodologie ».
- [238] Note CEA-AREVA DPAD/CMDT/NT/2014-012 Ind.0 - « Plan d’expérience pour l’étude de la réactivité thermique des enrobés STE La Hague (STE2/STE3) et STEL Marcoule (Période 3/4) ; interprétation des résultats expérimentaux ».
- [239] Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2016-2018.
- [240] Avis CODEP-MEA-2017-014920, Avis et Recommandations du Groupe Permanent pour les Déchets et du Groupe Permanent pour les laboratoires et usines du 28/03/2017 - Spécification de production et acceptabilité en stockage géologique du colis C5.
- [241] Biasi, G.P., Wesnousky, S.G., 2016. Steps and gaps in ground ruptures: Empirical bounds on rupture propagation. Bulletin of the Seismological Society of America, 106 (3), pp. 1110-1124.
- [242] Wesnousky, S.G., Biasi, G.P., 2011. The length to which an earthquake will go to rupture. Bulletin of the Seismological Society of America, 101 (4), pp. 1948-1950.
- [243] Li & Gregory, 1974. Diffusion of ions in sea water and deep-sea sediments. Geochimica & Cosmochimica Acta 38, 703-714.
- [244] Mégnien C., 1980. Synthèse géologique du bassin de Paris. Vol. III. Lexique des noms de formation. BRGM, mém. 103, Orléans, 467 p.
- [245] Maubeuge P.L., 1974. Carte géologique de la France, feuille de Neufchâteau, notice explicative de la carte géologique à 1/50 000, BRGM, Orléans.
- [246] Avis IRSN N°2015-00421 du 22 décembre 2015 : Agressions extrêmes retenues pour la mise en place du « noyau dur » des réacteurs à eau sous pression. <http://www.irsn.fr/FR/expertise/avis/Documents/Avis-IRSN-2015-00421.pdf>
- [247] Dautères, A., De Windt, L., Marsal, F., Maillet, A., 2012. The OXITRAN project: Measuring and understanding the oxygen consumption in argillaceous media.
- [248] Brigaud, B., Durllet, C., Deconinck, J.-F., Vincent, B., Pucéat, E., Thierry, J., Trouiller, A., 2009. Facies and climate/environmental changes recorded on a carbonate ramp: A sedimentological and geochemical approach on Middle Jurassic carbonates (Paris Basin, France). Sedimentary Geology. 222, 181-206.
- [249] Matray, J.M., Lambert, M., Fontes, J.Ch., 1994. Stable isotope conservation and origin of saline waters from the Dogger aquifer of the Paris Basin, France. Appl.Geochem. 9, 297-309.
- [250] Wei, H.F., Ledoux, E., De Marsily, G., 1990. Regional modelling of groundwater flow and salt and environmental tracer transport in deep aquifers in the Paris Basin. J. Hydrol. 120 (1-4), 341-358.
- [251] Gonçalves, J., Violette, S., Guillocheau, F., Robin, C., Pagel, M., Bruel, D., de Marsily, G., Ledoux, E., 2004. Contribution of a three-dimensional regional scale basin model to the study of the past fluid flow evolution and the present hydrology of the Paris Basin, France. Basin Res. 16, 569-586.
- [252] Brigaud B, Durllet C., Deconinck J.-F., Vincent B., Pucéat E., Thierry J., Trouiller A., 2009. Facies and climate/environmental changes recorded on a carbonate ramp: A sedimentological and geochemical approach on Middle Jurassic carbonates (Paris Basin, France). Sedimentary Geology, Vol. 222, 3-4, p. 181-206.
- [253] Décision n°2017-DC-0587 de l’ASN du 23 mars 2017 relative au conditionnement des déchets radioactifs et aux conditions d’acceptation des colis de déchets radioactifs dans les installations nucléaires de base de stockage.
- [254] Note NT DPC/SECR 09-032 ind. A, 2009 - « Modèle d’évolution opérationnel des combustibles usés en système fermé. Conséquences sur le relâchement instantané des radionucléides (IRF) ».
- [255] De Loriol P., Royer E. et Tombeck H., 1872. Description géologique et paléontologique des étages jurassiques supérieurs de la Haute-Marne. Mémoire de la société linnéenne de Normandie, 542 p.

LISTE DES ACRONYMES

AIEA : Agence internationale de l'énergie atomique
AIP : Activités importantes pour la protection
APD : Avant-projet définitif
APM : Atelier pilote de Marcoule
APS : Avant-projet sommaire
BHP : Béton haute performance
CEA : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CP : Colis primaire
CS : Colis de stockage
CSA : Centre de stockage de l'Aube
CtS : Conteneur de stockage
CU : Combustibles usés
DAC : Demande d'autorisation de création
DAD : Déchets activés de déconstruction
DAE : Déchets activés d'exploitation
DAIE : Demande d'Autorisation d'Installation et d'Exploitation d'un laboratoire souterrain dans le site de l'Est
DORec : Référence [42]
DOS : Dossier d'options de sûreté
DOS-AF : Référence [40]
DOS-Expl : Référence [39]
DPCI : dispositions de protection contre l'incendie
EDF : Electricité de France
ECS : Evaluations complémentaires de sûreté
EDZ : Excavation damaged zone
EiP : Entreposage intermédiaire polyvalent
EIP : Eléments importants pour la protection
EP1, EP2 : Installations de surface
EPR : European pressurized water reactor
EQRS : Evaluation quantitative de risque sanitaire
ET : Emballage de Transport
ET-H : Emballage de type horizontal
ET-V : Emballage de type vertical
FAVL : Faible activité à vie longue
FOH : Facteurs organisationnels et humains
GPD : Groupe permanent d'experts pour les déchets
GPU : Groupe permanent d'experts pour les laboratoires et usines
HA : Haute activité
HA0 : Haute activité à faible exothermicité
HA1/HA2 : Haute activité exothermique
ICEDA : Installation de conditionnement et d'entreposage des déchets activés
IN : Inventaire national
INB : Installation nucléaire de base
INBS : Installation nucléaire de base secrète
IRF : Instant release fraction

ITER : Thermonuclear experimental reactor

MAVL : Moyenne activité à vie longue

MHM : Meuse/Haute-Marne

MOA : maîtrise d'ouvrage

MOE : maîtrise d'œuvre

MOX : Mixed oxides (ou Mélange d'oxydes)

ML : Métal lourd

PDD : Plan de développement des composants du projet [Cigéo](#) (version de 2014 en référence [35])

PDE : Référence [41]

PIGD : Programme industriel de gestion des déchets

PIVIC : Procédé d'incinération-vitrification in can

PUI : Plan d'urgence interne

REP : Réacteur à eau pressurisée

RES : Réacteur d'essais

RFS : Règle fondamentale de sûreté, émise par l'ASN

RGE : Règles générales d'exploitation

RJH : Réacteur expérimental Jules Horowitz

RNR : Réacteurs à neutrons rapides

RPS : Rapport préliminaire de sûreté

SEA : Scénario d'évolution altérée

SEN : Scénario d'évolution normale

SI : Scénario industriel

SMF : Séisme minimum forfaitaire (défini par le RFS 2001-01)

SMHV : Séisme maximal historiquement vraisemblable

SMPP: Séisme maximal physiquement possible (défini dans la [RFS 2001-01](#))

SMS : Séisme majoré de sécurité (défini dans la [RFS 2001-01](#))

SPX : Superphénix

SSC : structures, systèmes et composants importants pour la sûreté

THE : Très haute efficacité (filtre)

TOP : Traitement Oxyde Pilote

TOR : Traitement Oxyde Rapide

UNGG : Uranium naturel graphite gaz

UOX : Uranium oxide (ou oxyde d'uranium)

URE : Uranium de retraitement enrichi

UA : unité argileuse du Callovo-Oxfordien (divisée en UA1, UA2 et UA3), au sein de laquelle est implanté le niveau principal du Laboratoire souterrain et où l'Andra prévoit également d'implanter l'installation souterraine de [Cigéo](#)

USC : unité silto-carbonaté du Callovo-Oxfordien, au sein de laquelle est implantée la niche du Laboratoire souterrain

UT : unité de transition du Callovo-Oxfordien, située entre l'UA et l'USC

What-if : Scénario peu vraisemblable visant à tester la robustesse du stockage à long terme

ZBS : ZIRA borehole survey

ZDN : Zone de déchets nucléaires

ZEXP : Zone d'exploitation en surface

ZFC : Zone de dracturation connectée

ZFd : Zone de fracturation discrète

ZFD : Zone de fracturation diffuse

ZIRA : Zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie

ZSL : Zone de soutien logistique

ZT : Zone de transposition