



Cellules d'essai du parc à résidus de la Kwé Ouest – Suivi 2014 à 2016

Suivi post-remplissage – Mai 2015 à Mai 2016



Affaire 14-0008.A01 [X/X]

Document A16-0639

Révision : 00

2016-06-03

S.E. A2EP - tél (687) 27 55 00
R.C.S. Nouméa 2002 B 656 280 (2002 B 179)
14, rue Edouard Glasser – Motor Pool
BP 8176 – 98 807 NOUMÉA
www.a2ep.nc

Client	VALE NC
Interlocuteur	Julien Blanche
Titre du document	Cellules d'essai du parc à résidus de la Kwé Ouest – Suivi 2014 à 2016
Sous-titre du document	Suivi post-remplissage – Mai 2015 à Mai 2016
Numéro de l'affaire	Affaire 14-0008.A01 [X/X]
Numéro de document	Document A16-0639
Révision	Révision : 00
Charge d'affaire	Nicolas CAZE
Date de mise à disposition du rapport	2016-06-03
Coordonnées X,Y (RGNC Lambert)	494035, 209644
Mots clés	Résidus, Instrumentation, Suivi réglementaire
Signature du rédacteur :	
Signature du vérificateur :	

Indice	Version	Rédacteur	Vérificateur	Date
00	Draft	NC	MMA	2016-06-01

SOMMAIRE

1 CADRE DU DOCUMENT	6
1.1 CELLULES D'ESSAI DU PARC A RESIDUS DE LA KWE OUEST	6
1.2 CONTENU DU DOCUMENT.....	7
2 PROGRAMME DE SUIVI ET D'INSTRUMENTATION	7
2.1 CONTENU DU PROGRAMME (RAPPEL)	7
2.2 MATERIELS UTILISES.....	8
2.3 REFERENCES DES EQUIPEMENTS DE MESURE ET LOCALISATION.....	8
2.4 REFERENCES DES PRELEVEMENTS ET ESSAIS.....	10
3 CHRONOLOGIE, MESURES ET PRELEVEMENTS REALISES	11
3.1 REMPLISSAGE DES CELLULES.....	11
3.2 LEVES TOPOGRAPHIQUES REALISES	11
3.3 PRELEVEMENTS D'EAU REALISES.....	12
3.4 CAROTTAGES REALISES - REMPLISSAGE	13
3.5 CAROTTAGES REALISES – JUIN 2015, SEPTEMBRE 2015, AVRIL 2016.....	13
4 NIVEAUX DE RESIDUS ET BILAN HYDROLOGIQUE.....	15
4.1 LEVES TOPOGRAPHIQUES – NIVEAUX DES RESIDUS	15
4.2 APPROCHE DU BILAN HYDROLOGIQUE – PLUVIOMETRIE, EVAPORATION, DEBIT DE SURVERSE .	18
5 RESULTATS ANALYTIQUES - PRELEVEMENTS D'EAU ET DE RESIDUS	21
5.1 ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX DE SURVERSE.....	21
5.2 ANALYSES CHIMIQUES DES RESIDUS - EAUX INTERSTITIELLES.....	23
6 RESULTATS DES CARACTERISATIONS DE MATERIAUX - CAROTTAGES – JUIN 2015, SEPTEMBRE 2015 , AVRIL 2016	24
6.1 DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DES RESIDUS	24
6.2 CARACTERISATION MINERALOGIQUE DES RESIDUS.....	29
6.3 ESSAIS GEOTECHNIQUES SUR LES CAROTTES DE RESIDUS.....	33

7 ESSAIS ET MESURES IN-SITU – MAI 205 A MAI 2016.....	37
7.1 PRESSIONS INTERSTITIELLES.....	37
7.2 ESSAIS IN-SITU – RESISTANCE AU CISAILLEMENT.....	43
7.3 ESSAIS IN-SITU – CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE.....	44

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Cellules d'essai - localisation des points de mesure et de prélèvement.....	9
Figure 2 : Cellules d'essai – débits de surverse mesurés aux exutoires	19
Figure 3 : Pressions interstitielles – Cellule Inondée	38
Figure 4 : Pressions interstitielles – Cellule Exondée	39
Figure 5 : Températures – Cellule Inondée	41
Figure 6 : Températures – Cellule Exondée	42

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Matériels utilisés pour les mesures et les prélèvements	8
Tableau 2 : Codification des échantillons, programme d'essais.....	10
Tableau 3 : Dates des relevés topographiques (niveau des résidus) – Janvier 2015 à Avril 2016 ...	11
Tableau 4 : Echantillons d'eau de surverse - 2014-12-12 à 2015-02-24 (remplissage).....	12
Tableau 5 : Echantillons d'eau de surverse - 2015-03-03 à 2015-08-19 (post-remplissage).....	12
Tableau 6 : Echantillons de résidus lors du remplissage - 2014-12-12 à 2015-03-03	13
Tableau 7 : Echantillons de résidus – Campagne de juin 2015	14
Tableau 8 : Echantillons de résidus – Campagne de septembre 2015	14
Tableau 9 : Echantillons de résidus – Campagne d'avril 2016.....	14
Tableau 10 : Niveaux de référence dans les bassins	15
Tableau 11 : Hauteur moyenne de résidus - Remplissage – Janvier à mars 2015.....	15
Tableau 12 : Hauteur moyenne de résidus par emplacement et par cellule – Mars 2015 à Avr 2016	16
Tableau 13 : Rythme de tassement des résidus - Mars 2015 à Avr 2016	17
Tableau 14 : Totaux pluie et ETP – Janvier à septembre 2015.....	18
Tableau 15 : Volumes écoulés en aval des cellules – Janvier à août 2015.....	18

Tableau 16 : Surface (apport/évaporation) par cellule	19
Tableau 17 : Bilan hydrique – cellule inondée - mars à septembre 2015.....	20
Tableau 18 : Bilan hydrique – cellule exondée - mars à septembre 2015.....	20
Tableau 19 : Analyses d'eau de surverse – Cellule exondée - Principaux paramètres	21
Tableau 20 : Analyses d'eau de surverse – Cellule inondée - Principaux paramètres	22
Tableau 21 : Principales valeurs de distribution granulométrique – Echantillons de résidus déposés aux profondeurs 100, 200, 300, 400 – Cellule inondée/exondée.....	24
Tableau 22 : Distribution granulométrique – Cellule exondée – Dépôt – juin 2015 à avril 2016	25
Tableau 23 : Distribution granulométrique – Cellule exondée – Surverse – Juin 2015 à avril 2016 .	26
Tableau 24 : Distribution granulométrique – Cellule inondée – Dépôt – juin 2015 à avril 2016	27
Tableau 25 : Distribution granulométrique – Cellule inondée – Surverse - juin 2015 à avril 2016	28
Tableau 26 : Phases détectées par analyse RX – Echantillons de résidus – EXD, EXS, IND, INS – profondeurs 0-1, 1-2 et 2-3m – Juin 2015	30
Tableau 27 : Phases détectées par analyse RX – Echantillons de résidus – EXD, EXS, IND, INS – profondeurs 0-1, 1-2 et 2-3m – Sept 2015	31
Tableau 28 : Phases détectées par analyse RX – Echantillons de résidus – EXD, EXS, IND, INS – profondeurs 0-1, 1-2 et 2-3m – Avril 2016	32
Tableau 29 : Essais géotechniques sur carottes et normes de référence - Juin 2015	33
Tableau 30 : Résultats essais géotechniques (A2EP) sur les résidus – Juin 2015	34
Tableau 31 : Résultats essais géotechniques (A2EP) sur les résidus – Sept 2015	34
Tableau 32 : Résultats essais géotechniques (A2EP) sur les résidus – Avril 2016	35
Tableau 33 : Résultats essais oedométriques (A2EP) sur les résidus – Juin 2015.....	36
Tableau 34 : Résultats essais oedométriques (A2EP) sur les résidus – Sept 2015.....	36
Tableau 35 : Résultats essais oedométriques (A2EP) sur les résidus – Avril 2016.....	36
Tableau 36 : Mesures au scissomètre – Avril 2016 – Valeur de rupture en kPa.....	43
Tableau 37 : Piézomètres pour chocs hydrauliques – position crépine/résidu	45
Tableau 38 : Essais de perméabilité – Chocs hydrauliques – Résultats (Juin 2015, Sept 2015, Avr 2016)	46

1 CADRE DU DOCUMENT

1.1 CELLULES D'ESSAI DU PARC A RESIDUS DE LA KWE OUEST

VALE NC exploite une usine hydrométallurgique permettant l'extraction de ferro-nickel à partir du minerai latéritique du site de Goro. Le procédé de traitement du minerai génère des résidus qui seront stockés, pour les 5 premières années d'exploitation du gisement, dans le parc à résidus de la Kwé Ouest (KWSRF).

Au titre de l'arrêté d'autorisation d'exploiter ce parc à résidus (arrêté ICPE), il a été demandé par l'autorité de tutelle la création et le remplissage de deux cellules d'essai : une cellule « inondée », une cellule « exondée ».

Ces dispositifs sont destinés à caractériser de manière fine le comportement des résidus (modalités de tassement, chimie de la matrice solide, chimie des eaux surnageantes, etc.).

VALE NC, par la commande PO70762 du 8 septembre 2014, a confié à A2EP la mise en place de l'instrumentation et la réalisation des essais et mesures prévues au titre de l'arrêté ICPE pour la première année de fonctionnement des cellules.

Les deux cellules d'essai ont été construites et étanchéifiées en 2010, les travaux de finition permettant leur remplissage (mise en place de déversoirs de surverse, mise en place de conduites d'alimentation) ont été achevés en septembre 2014. Le remplissage a été réalisé en 4 étapes, de septembre 2014 à mars 2015, en utilisant des résidus représentatifs du fonctionnement en marche normale de l'usine hydrométallurgique de VALE NC.

Des mesures, prélèvements et analyses ont été réalisés au cours du remplissage et en fin de remplissage (Campagne de prélèvements de janvier 2015), et le suivi va s'étendre sur plusieurs mois conformément aux exigences formulées dans l'arrêté ICPE.

Le rapport « Remplissage et post-remplissage – Sept 2014 à avril 2015 » (A2EP ref A15-0537, R0B, 15/5/2015) contient les éléments suivants :

- Description du programme de suivi prévisionnel, récolelement de l'instrumentation installée pour référence future
- Description du programme de suivi réalisé avant et lors du remplissage (mesures, prélèvements, analyses)
- Restitution des résultats de suivi

Le présent document restitue la suite du suivi, soit les données acquises de mai 2015 à avril 2016, ainsi que les résultats des campagnes de prélèvements et de mesures réalisée en juin 2015 et avril 2016.

 VALE NC	Cellules d'essai du parc à résidus de la Kwé Ouest – Suivi 2014 à 2016	<i>Révision : 00</i> <i>2016-06-03</i>
	Suivi post-remplissage – Mai 2015 à Mai 2016	Page : 7 / 57

1.2 CONTENU DU DOCUMENT

Le présent document traite les points suivants :

- Suivi de l'instrumentation in-situ : pressions interstitielles, débits aux exutoires, pluviométrie
- Suivi du tassement : levés topographiques de la surface des résidus
- Suivi de la qualité des eaux aux exutoires (analyse des prélèvements)
- Campagne de mesures sur site de juin 2015 : scissomètre, mesure de perméabilité par chocs hydrauliques sur des piézomètres
- Campagne de carottage de juin 2015 : analyses chimiques et essais géotechniques sur les carottes

2 PROGRAMME DE SUIVI ET D'INSTRUMENTATION

2.1 CONTENU DU PROGRAMME (RAPPEL)

Le programme de suivi des cellules d'essai est défini à l'annexe III de l'arrêté 1466-2008/PS du 9 octobre 2008 d'autorisation d'exploiter le parc à résidus de la Kwé Ouest Appel d'offres VALE NC. Se reporter au rapport « Remplissage et post-remplissage – Sept 2014 à avril 2015 » pour les détails.

Le programme décrit dans l'arrêté a été adapté sur la base des contraintes de site, de manière à respecter l'objectif d'obtenir des données complètes et exploitables :

- La fréquence de relèves (relevés topo, relevé des sondes piezo) a été adaptée selon le rythme effectif de remplissage (en particulier, relevés topographiques de la surface de résidus hebdomadaires et non quotidiens)
- Les sondes piézométriques sont relevées à fréquence hebdomadaire ou mensuelle mais ces sondes sont associées à un enregistreur de données (datalogger) qui conserve les données avec un pas de temps horaire
- Le niveau de remplissage des cellules a été adapté pour éviter que le résidu ne déborde au niveau des déversoirs. De ce fait, la hauteur finale totale est légèrement inférieure aux 4 m prévus initialement
- Les analyses de « fraction totale » n'ont pas été réalisées pour l'eau interstitielle, la nature des échantillons (filtrés au préalable) ne permettant d'obtenir que la fraction dissoute.

En outre, compte tenu de l'état du matériau lors de la campagne de carottage de juin 2015, les profondeurs et découpage des échantillons ont été adaptées. Il n'a pas été possible d'obtenir d'échantillons non remaniés.

2.2 MATERIELS UTILISES

Le tableau suivant rappelle les matériels utilisés pour réaliser les différents suivis. Se reporter au rapport de Suivi Sept 2014-Juin 2014 pour les détails.

Activité	Matériel
Pressions interstitielles	Sondes PWS (RocTest)
Débit de surverse	Seuil calibré (V) et mesure de hauteur d'eau par sondes LevelTroll 500 InSitu
Conductivité hydraulique in-situ	Piezomètres crépinés pour réalisation de mesure par choc hydraulique
Résistance au cisaillement	Scissomètre Geonor H70 (longueur 10 m, gammes de mesure 0-80 et 0-160 kPa)
Consolidation	Plaques et repères de tassement (tiges verticales pour situer les plaques)
Prélèvement de carottes (résidus humides)	Préleveur à sédiments SDEC
Prélèvement de carottes (résidus consolidés)	Carottier SDEC

Tableau 1 : Matériels utilisés pour les mesures et les prélèvements

2.3 REFERENCES DES EQUIPEMENTS DE MESURE ET LOCALISATION

Les prélèvements et instruments installés sur site sont repérées en fonction de la cellule d'installation (IN = inondée, EX=exondée) et de l'emplacement (D = début/dépôt, S = sortie/surverse).

Les équipements sont référencés de la manière suivante :

- Sondes de mesure de pression interstitielle : INDnnn-xx, INSnnn-xx, EXDnnn-xx, EXSnnn-xx / nnn (profondeur en centimètres) = 125,200, 275 et 350
- Piézomètres : PZINDnnn, PZINSnnn, PZEXDnnn, PZEXSnnn / nnn=125,200, 250 et 350

Le plan page suivante présente la configuration des cellules d'essai, la position des moyens d'accès et la localisation des appareils de mesure à l'issue du remplissage (3 mars 2015).

 VALE VALE NC	Cellules d'essai du parc à résidus de la Kwé Ouest – Suivi 2014 à 2016	<i>Révision : 00</i> <i>2016-06-03</i>
	Suivi post-remplissage – Mai 2015 à Mai 2016	<i>Page : 9 / 57</i>

Figure 1 : Cellules d'essai - localisation des points de mesure et de prélèvement

 VALE NC	Cellules d'essai du parc à résidus de la Kwé Ouest – Suivi 2014 à 2016	Révision : 00 2016-06-03
	Suivi post-remplissage – Mai 2015 à Mai 2016	Page : 10 / 57

2.4 REFERENCES DES PRELEVEMENTS ET ESSAIS

Les échantillons et analyses sont référencés selon les codes présentés dans le tableau ci-dessous, qui précise les laboratoires retenus pour réaliser les analyses.

Code Analyse	Type d'analyse	Prélèvement Mesure	Type Echantillon	Laboratoire	Eléments
ACI	Analyse chimique complète	Eau interstitielle	remanié	VALE	Mesure In-situ : T°,pH,Eh,cond,O2 Analyse Liste C Annexe IV
ACR	Chimie complète	Résidus	remanié	WESSLING	Analyse : Al, Fe, Cu, Pb, Zn, Mn, Ni, Co, Cr, As, S, Na, Ca, K, Mg
ACS	Analyse chimique complète	Eau de surverse		VALE	Mesure In-situ : T°,pH,Eh,cond,O2 Analyse Liste C Annexe IV
ACP	Principaux paramètre physicochimique	Eau de surverse		VALE	Analyse : T°, pH, cond, Eh, O2, Alcalinité, SO4, Mg, Mn
AG	Analyse granulométrique	Résidus	remanié	UNC	
OE	Essai oedométrique et conductivité hydraulique	Résidus	non remanié	INSA (mars 2015) A2EP (juin 2015)	
GS	Poids spécifique des particules solides (Gs)	Résidus	remanié	A2EP	
RX	Minéralogie par diffraction RX	Résidus	remanié	UNC	
TE	Teneur en eau	Résidus	non remanié	A2EP	
KR	Résistance au cisaillement	Cisaillement	pas d'échantillon	A2EP	
KS	Conductivité hydraulique	Conductivité hydraulique (in-situ)	pas d'échantillon	A2EP	
MVH	Masse volumique humide	Résidus	non remanié	A2EP	
PZ	Dissipation des pressions interstitielles	Relève des sondes piézoélectrique	pas d'échantillon	A2EP	
Q	Débit de surverse	Débit sur les déversoirs	pas d'échantillon	A2EP	
Topo	Nivellement	Consolidation des résidus	pas d'échantillon	Geomer	Levé de : tassomètres, piezo, niveau eau dans chaque cellule

Tableau 2 : Codification des échantillons, programme d'essais

3 CHRONOLOGIE, MESURES ET PRELEVEMENTS REALISES

3.1 REMPLISSAGE DES CELLULES

Le remplissage a été réalisé du 12/12/2014 au 3/3/2015, en 4 étapes, afin de permettre la réalisation des prélèvements sur les tranches représentatives des niveaux 0-1m, 1-2m, 2-3m, 3-4m par rapport au fond.

Le remplissage a été réalisé uniquement dans les périodes de « marche normale » de l'usine métallurgique, afin d'assurer une bonne représentativité des échantillons.

Se reporter au rapport « Remplissage et post-remplissage – Sept 2014 à avril 2015 » pour le détail des étapes de remplissage et les échantillons/mesures réalisées lors du remplissage.

3.2 LEVES TOPOGRAPHIQUES REALISES

Un état des lieux du fond des cellules a été réalisé avant le début du remplissage (20/10/2014). Un état des lieux de l'instrumentation et des accès a été réalisé à la fin de l'installation des pontons (23/12/2014).

Au cours du remplissage (janvier/février 2015), 5 levés ont réalisés (12, 19 et 27 janvier, 10 et 24 février 2015).

Le tableau ci-dessous récapitule les levés réalisés à partir de la fin du remplissage des cellules.

Ces levés ont été réalisés à fréquence hebdomadaire de mars à mai (sauf une semaine non réalisée en avril), et à fréquence mensuelle à partir de juin 2015, soit un total de 17 levés réalisés de mars à septembre 2015.

Mois	Date des levés
Mars 2015	3, 13, 18, 26
Avril 2015	2, 10, 15, 29
Mai 2015	8, 13, 22, 29
Juin 2015	4, 10
Juillet 2015	8
Août 2015	5
Sept 2015	7
Oct 2015	6
Nov 2015	5
Dec 2015	3
Janv 2016	6
Fev 2016	3
Mars 2016	23
Avril 2016	5

Tableau 3 : Dates des relevés topographiques (niveau des résidus) – Janvier 2015 à Avril 2016

3.3 PRELEVEMENTS D'EAU REALISES

Eau de surverse		
Date	IN	EX
12/01/2015	ACS	ACS
19/01/2015	ACP	---
27/01/2015	ACP	---
10/02/2015	ACS	ACS
17/02/2015	ACP	xxx
24/02/2015	ACP	ACP

Tableau 4 : Echantillons d'eau de surverse - 2014-12-12 à 2015-02-24 (remplissage)

Eau de surverse		
Date	IN	EX
12/03/2015	ACS	ACS
18/03/2015	ACP	---
25/03/2015	ACP	ACP
01/04/2015	ACP	ACP
08/04/2015	ACS(*)	ACS(*)
13/04/2015	ACP	ACP
22/04/2015	---	ACP
29/04/2015	ACP	ACP
06/05/2015	ACS	ACS
13/05/2015	ACP	ACP
21/05/2015	ACP	ACP
27/05/2015	ACP	ACP
03/06/2015	ACS	ACS
09/06/2015 (campagne carottage)	ACP	ACP
17/06/2015	ACP	ACP
23/06/2015	ACP	ACP
01/07/2015	ACS	ACS
07/07/2015	ACP	ACP
15/07/2015	ACP	ACP
22/07/2015	ACP	ACP
29/07/2015	ACS	ACS
05/08/2015	ACP	ACP
12/08/2015	ACP	ACP
19/08/2015	ACP	ACP

Tableau 5 : Echantillons d'eau de surverse - 2015-03-03 à 2015-08-19 (post-remplissage)

xxx : eau trop chargée (résidus débordant, non prélevé) / --- : échantillon non réalisé car pas d'écoulement

ACS(*) : problème de sonde, mesures reprises le 10/4 / prélèvements par A2EP jusqu'au 1/7/2015 inclus

3.4 CAROTTAGES REALISES - REMPLISSAGE

Echantillons de résidus		
Date	IN	EX
12/01/2015	ACI/ACR (400)	ACI/ACR (400)
19/01/2015	ACI/ACR (300)	ACI/ACR (300)
10/02/2015	ACI/ACR (200)	ACI/ACR (200)
03/03/2015	ACI/ACR (100)	ACI/ACR (100)

Tableau 6 : Echantillons de résidus lors du remplissage - 2014-12-12 à 2015-03-03

3.5 CAROTTAGES REALISES – JUIN 2015, SEPTEMBRE 2015, AVRIL 2016

Les prélèvements ont été réalisés en utilisant le carottier SDEC avec trousse coupante et marteau de percussion. Au vu de l'état du matériau (très humide et peu consolidé), le marteau n'a jamais été utilisé.

Les carottes obtenues sont contenues dans des tubes (PEHD transparent de 1m, diamètre 50mm, volume total 1,8 l).

Le sens de prélèvement (haut/bas) est repéré sur chaque carotte, et des sous-échantillons (demi-carottes de 50 cm) sont constitués au laboratoire, de manière à réaliser des essais pour 5 profondeurs tel que prévus par l'arrêté.

Compte tenu de l'état du matériau (teneur en eau élevée limitant la possibilité de constituer des échantillons non remaniés) et de l'épaisseur effective de dépôt (3,5 m au maximum), le plan d'échantillonnage sur site a été revu de la manière suivante :

- Prélèvements en 4 points : EXD (cellule exondée, dépôt), EXS (cellule exondée, surverse), IND (cellule inondée, dépôt), INS (cellule inondée, surverse)
- Par point : Prélèvement d'une carotte à la profondeur 1-2m pour essai oedométrique et conductivité (OE, KS)
- Par point : Prélèvements réalisés en carottes de 1 m aux profondeurs 0-1m, 1-2m, 2-3m – les profondeurs sont mesurées depuis la surface du résidu au point de prélèvement, avec 3 carottes à chaque niveau (3 à destination du labo VALE NC pour ACI, analyse des eaux interstitielles, 1 à destination du labo A2EP). Pour obtenir suffisamment de matériaux pour les analyses d'eau interstitielle, il a été nécessaire de tripler la quantité de matériau prélevé (soit 3 carottes par niveau réalisées pour les ACI).
- Programme prévisionnel pour chacune des carottes de 1 m amenée au labo A2EP :
 - Carottes aux profondeurs 0-1m, 1-2m, 2-3m : RX (analyse RX)
 - Sous-échantillons aux profondeurs 0-1m, 1-1.5m, 1.5-2m, 2-2.5m, 2.5-3m : TE (teneur en eau), MVH (masse volumique humide), GS (poids spécifique des particules solides), AG (analyse granulométrique)

Les prélèvements prévus sur site ont été réalisés, suivant le tableau ci-dessous.

Echantillons de résidus			
Date	Emplacements	Profondeurs	Quantité
08/06/2015	IND, INS	0-1 m	3
		1-2 m	4
		2-3 m	3
09/06/2015	EXD, EXS	0-1 m	3
		1-2 m	4
		2-3 m	3
10/06/2015	IND, INS, EXD, EXS	0-1 m	1
		1-2 m	1
		2-3 m	1

Tableau 7 : Echantillons de résidus – Campagne de juin 2015

Echantillons de résidus			
Date	Emplacements	Profondeurs	Quantité
08/09/2015	EXD, EXS, INS, IND	0-1 m	2
		1-2 m	3
		2-3 m	2

Tableau 8 : Echantillons de résidus – Campagne de septembre 2015

Echantillons de résidus			
Date	Emplacements	Profondeurs	Quantité
05/04/2016	EXD, EXS, INS, IND	0-1 m	2
		1-2 m	3
		2-3 m	2

Tableau 9 : Echantillons de résidus – Campagne d'avril 2016

Il était initialement prévu de réaliser des sous-échantillons représentatifs des profondeurs prélevées tous les 50 cm, soit des sous-échantillons pour profondeurs 0-1m, 1-1.5m, 1.5-2m, 2-2.5m, 2.5-3m.

En pratique, en juin 2015, l'état très liquide du matériau n'a permis de réaliser ce sous-échantillonage que pour les analyses granulométriques AG (en extrayant un faible volume de matériau à chaque extrémité des carottes), mais pas pour les autres essais (TE, MVH, GS).

En septembre 2015 et avril 2016, le sous-échantillonage est effectif pour tous les essais.

4 NIVEAUX DE RESIDUS ET BILAN HYDROLOGIQUE

4.1 LEVES TOPOGRAPHIQUES – NIVEAUX DES RESIDUS

Un premier levé topographique a permis de caler les altimétries de référence : niveau des seuils aux exutoires des bassins (qui conditionne le niveau du plan d'eau dans les bassins) et niveau du fond des cellules avant remplissage.

Mesure	Cellule	Emplacement	Etape	Z
Z batardeau	EX	Haut du batardeau	20/10/2014	244.37
Fond bassin	EX	Moyen	20/10/2014	240.79
Z DO	EX	Bas du V	20/10/2014	243.09
Fond bassin	IN	Moyen	20/10/2014	240.11
Z DO	IN	Bas du V	20/10/2014	243.85

Tableau 10 : Niveaux de référence dans les bassins

En se basant sur le niveau du fond du bassin observé avant remplissage, les levés topo permettent d'obtenir une estimation de la hauteur de résidus dans le bassin. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant.

H résidus [m]	EXONDEE				INONDÉE		
	Date	Depot	Centre	Surverse	Depot	Centre	Surverse
12/01/2015	0.55	0.26	0.21	0.87	0.68	0.68	0.64
19/01/2015	1.40	0.92	0.72	1.38	1.24	1.24	1.07
27/01/2015	2.05	1.76	1.73	2.05	1.81	1.81	1.71
10/02/2015	2.31	2.02	1.88	3.12	2.60	2.60	2.56
24/02/2015	2.44	2.31	2.10	3.18	2.83	2.83	2.68
03/03/2015	2.73	2.54	2.44	3.39	3.10	3.10	2.85

Tableau 11 : Hauteur moyenne de résidus - Remplissage – Janvier à mars 2015

En fin de remplissage (3/3/2015), la hauteur moyenne de résidu est de 2,5 m pour la cellule exondée, et de 3,1 m pour la cellule inondée. Ces valeurs sont inférieures aux niveaux visés initialement. Il n'a pas été possible d'atteindre des niveaux plus élevés, des apports additionnels de résidus (avec une fraction liquide importante) conduisant à des débordements et départs de résidus au niveau des déversoirs.

La pente initiale de la plage de résidus est de 0,6% pour la cellule exondée (33 cm sur 50m) et de 0,5% pour la cellule inondée (25 cm sur 50m). En septembre, la pente est passée à 0,34%, donc sensiblement diminuée, pour la cellule exondée (17 cm sur 50 m) et de 0,46%, inchangée, pour la cellule inondée (23 cm sur 50m).

Les tableaux page suivante résument l'évolution des résidus (tassemement) dans la période de consolidation après remplissage, de mars à septembre 2015. Le rythme moyen de tassemement est de 2mm/j pour deux cellules, légèrement plus (2,5 mm/j) au niveau du dépôt de la cellule exondée.

H résidus [m]	EXONDEE				INONDEE		
	Date	Depot	Centre	Surverse	Depot	Centre	Surverse
12/03/2015	3.15	2.98	2.82	3.70	3.54	3.45	
18/03/2015	3.11	2.93	2.80	3.64	3.44	3.37	
26/03/2015	3.07	2.90	2.77	3.61	3.40	3.31	
02/04/2015	3.05	2.87	2.75	3.59	3.36	3.28	
10/04/2015	3.02	2.85	2.74	3.57	3.33	3.24	
15/04/2015	3.01	2.86	2.74	3.57	3.32	3.24	
29/04/2015	2.99	2.84	2.73	3.55	3.33	3.23	
07/05/2015	2.98	2.83	2.74	3.53	3.31	3.23	
13/05/2015	2.95	2.80	2.72	3.52	3.28	3.20	
22/05/2015	2.95	2.82	2.73	3.50	3.31	3.22	
29/05/2015	2.94	2.81	2.72	3.47	3.30	3.21	
04/06/2015	2.92	2.80	2.71	3.47	3.27	3.20	
10/06/2015	2.91	2.79	2.70	3.46	3.27	3.20	
08/07/2015	2.88	2.78	2.69	3.45	3.26	3.21	
05/08/2015	2.86	2.76	2.68	3.44	3.26	3.20	
07/09/2015	2.80	2.70	2.63	3.42	3.27	3.19	
06/10/2015	2.75	2.64	2.57	3.40	3.23	3.16	
05/11/2015	2.73	2.61	2.54	3.40	3.23	3.17	
03/12/2015	2.67	2.54	2.46	3.39	3.22	3.16	
06/01/2016	2.64	2.50	2.43	3.39	3.25	3.18	
03/02/2016	2.60	2.45	2.40	3.40	3.25	3.18	
23/03/2016	2.62	2.49	2.40	3.36	3.23	3.16	
05/04/2016	2.63	2.48	2.40	3.38	3.24	3.16	

Tableau 12 : Hauteur moyenne de résidus par emplacement et par cellule – Mars 2015 à Avr 2016

Rythme de tassement [mm/j]		EXONDEE			INONDEE		
Date n	Jours (n à n+1)	Depot	Centre	Surverse	Depot	Centre	Surverse
12/03/2015	6 j	-6.7	-8.3	-3.3	-10.0	-16.7	-13.3
18/03/2015	8 j	-5.0	-3.8	-3.8	-3.8	-5.0	-7.5
26/03/2015	7 j	-2.9	-4.3	-2.9	-2.9	-5.7	-4.3
02/04/2015	8 j	-3.8	-2.5	-1.2	-2.5	-3.8	-5.0
10/04/2015	5 j	-2.0	2.0	0.0	0.0	-2.0	0.0
15/04/2015	14 j	-1.4	-1.4	-0.7	-1.4	0.7	-0.7
29/04/2015	8 j	-1.2	-1.2	1.2	-2.5	-2.5	0.0
07/05/2015	6 j	-5.0	-5.0	-3.3	-1.7	-5.0	-5.0
13/05/2015	9 j	0.0	2.2	1.1	-2.2	3.3	2.2
22/05/2015	7 j	-1.4	-1.4	-1.4	-4.3	-1.4	-1.4
29/05/2015	6 j	-3.3	-1.7	-1.7	0.0	-5.0	-1.7
04/06/2015	6 j	-1.7	-1.7	-1.7	-1.7	0.0	0.0
10/06/2015	28 j	-1.1	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	0.4
08/07/2015	28 j	-0.7	-0.7	-0.4	-0.4	0.0	-0.4
05/08/2015	33 j	-1.8	-1.8	-1.5	-0.6	0.3	-0.3
07/09/2015	29 j	-1.7	-2.1	-2.1	-0.7	-1.4	-1.0
06/10/2015	30 j	-0.7	-1.0	-1.0	0.0	0.0	0.3
05/11/2015	28 j	-2.1	-2.5	-2.9	-0.4	-0.4	-0.4
03/12/2015	34 j	-0.9	-1.2	-0.9	0.0	0.9	0.6
06/01/2016	28 j	-1.4	-1.8	-1.1	0.4	0.0	0.0
03/02/2016	49 j	0.5	0.7	0.0	-0.7	-0.4	-0.4
23/03/2016	13 j	0.5	-0.5	0.2	1.3	0.6	-0.2
MOYENNE du							
12/3/2015 au							
5/4/2016		390 j	-1.3	-1.3	-1.1	-0.8	-0.8
							-0.7

Tableau 13 : Rythme de tassement des résidus - Mars 2015 à Avr 2016

4.2 APPROCHE DU BILAN HYDROLOGIQUE – PLUVIOMETRIE, EVAPORATION, DEBIT DE SURVERSE

La pluie et l'évaporation sont mesurés par la station météorologique du parc à résidus, référence 98832104, située au droit des cellules et opérée par Météo France pour le compte de VALE NC.

Mois	Pluie [mm]	ETP [mm]
2015-01	151	110
2015-02	349	80
2015-03	181	102
2015-04	228	78
2015-05	209	60
2015-06	193	63
2015-07	139	47
2015-08	98	76
2015-09	22	94
Total Janv-Sept 2015	1549	617

Tableau 14 : Totaux pluie et ETP – Janvier à septembre 2015

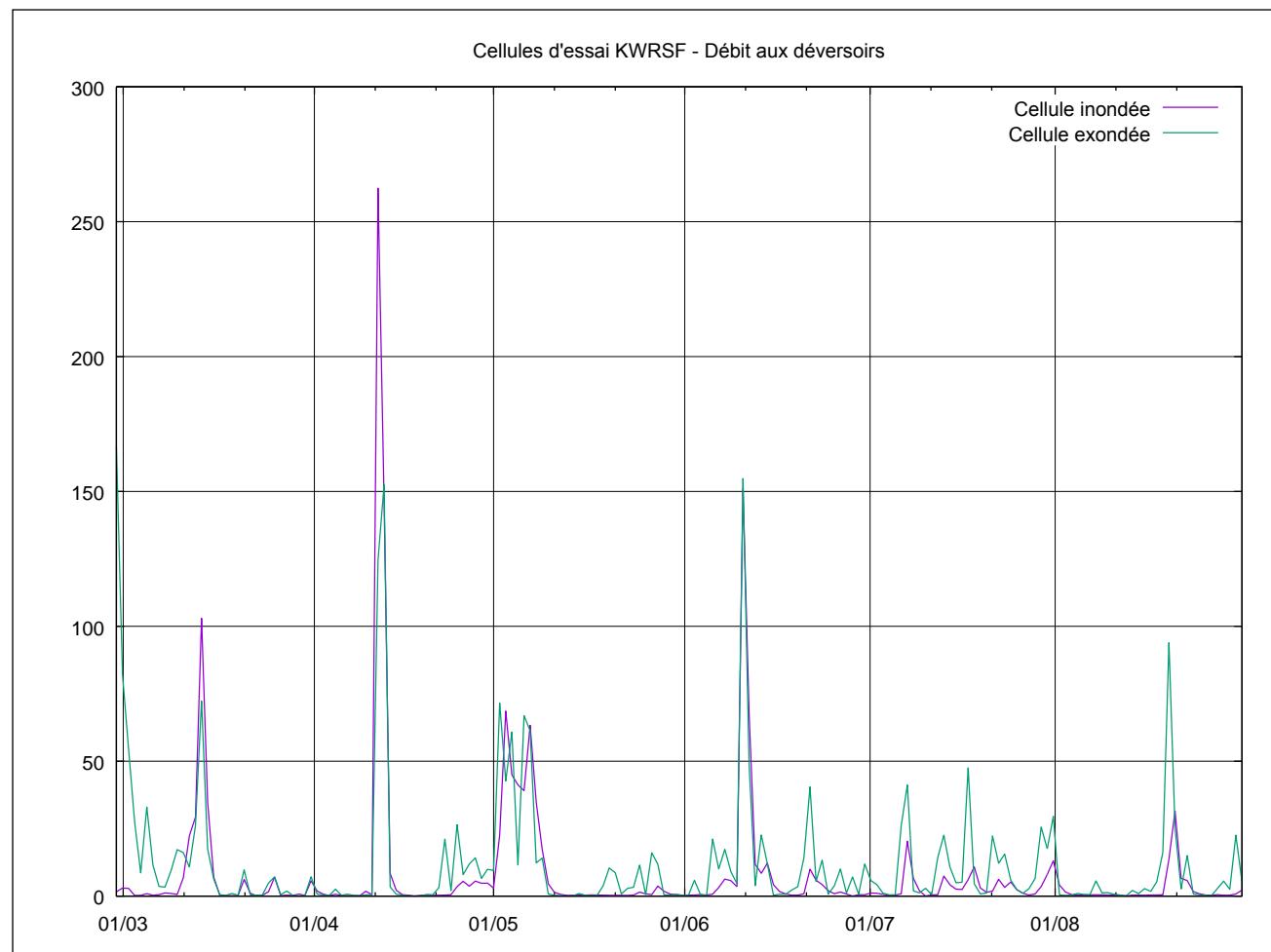
On relève 6 événements pluvieux significatifs (> 40 mm sur 24h) sur la période de janvier à septembre 2015, dont 3 au cours du remplissage (janvier/mars 2015) : 20/1/2015, 1/2/2015, 15 au 17/2/2015 (140 mm), 13 au 14/3/2015 (70 mm), 11 et 12/4/2015 (158 mm), 11/6/2015 (82 mm). La période d'observation apparaît exceptionnellement sèche.

Le débit est mesuré en sortie des cellules, par des seuils déversoirs en V, avec le niveau d'eau enregistrés par sondes Rugged Troll. Les valeurs corrigées par la pression atmosphérique et validées jusqu'au 1/9/2015 permettent d'obtenir une estimation de volume écoulé par période, résumé dans le tableau suivant.

Mois	Volume écoulé IN [m ³]	Volume écoulé EX [m ³]
2015-03	233	428
2015-04	462	400
2015-05	355	425
2015-06	306	416
2015-07	105	321
2015-08	88	243

Tableau 15 : Volumes écoulés en aval des cellules – Janvier à août 2015

Après septembre 2015, les travaux intervenant au droit des déversoirs ont conduit à l'arrêt des enregistrements de niveaux.

Figure 2 : Cellules d'essai – débits de surverse mesurés aux exutoires


Les surverses ont été associées aux phases de remplissage plus qu'aux apports pluviométriques, qui ne conduisent à une augmentation du débit de sortie que pour les événements les plus forts.

Les surfaces d'apport (bassins versants de collecte) et surfaces en eau des cellules (au niveau du déversoir) sont résumées ci-dessous.

Cellule	Surface IN [m ²]	Surface EX [m ²]
Surface d'apport	2337	2231
Surface plan d'eau	1261	972

Tableau 16 : Surface (apport/évaporation) par cellule

Les tableaux suivants présentent le bilan hydrique des cellules sur les 6 mois qui ont suivi le remplissage (mars à août 2015).

Mois	Pluie (m3)	ETP (m3)	Volume écoulé (m3)	BILAN cellule Inondée (m3)
2015-03	423	-129	-233	61
2015-04	533	-98	-462	-28
2015-05	489	-76	-355	58
2015-06	451	-80	-306	65
2015-07	325	-60	-105	160
2015-08	230	-96	-88	46

Tableau 17 : Bilan hydrique – cellule inondée - mars à septembre 2015

Un excédent (bilan positif) signifie que les apports (pluie) sont supérieurs à l'évaporation et au volume écoulé mesuré, le volume d'eau contenu dans la cellule devrait donc augmenter (excédent net pour la cellule inondée de 360 m3). Les faibles écoulements sont mesurés de manière peu précise (lame d'eau réduite au-dessus du V), ce qui peut expliquer l'écart constaté : en passant de 1 à 2 cm au-dessus du V, le volume cumulé mesuré sur un mois passe de 15 à 90 m3. On peut donc considérer le bilan de la cellule inondée comme équilibré aux incertitudes de mesure près

Mois	Pluie (m3)	ETP (m3)	Volume écoulé (m3)	BILAN cellule Exondée (m3)
2015-03	404	-99	-428	-124
2015-04	509	-76	-400	33
2015-05	467	-58	-425	-16
2015-06	431	-61	-416	-46
2015-07	310	-46	-321	-57
2015-08	220	-74	-243	-98

Tableau 18 : Bilan hydrique – cellule exondée - mars à septembre 2015

Pour la cellule exondée, le bilan apparaît globalement négatif, ce qui est le comportement attendu : les écoulements n'interviennent que lors des pluies, et ensuite l'eau s'évapore progressivement, à un rythme assez lent (308 m3, soit une lame d'eau de 320 mm sur 6 mois).

5 RESULTATS ANALYTIQUES - PRELEVEMENTS D'EAU ET DE RESIDUS

5.1 ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX DE SURVERSE

Les analyses ont été réalisées par le laboratoire (agrémenté et certifié COFRAC) de VALE NC.

Un tableau rassemblant l'ensemble des résultats d'analyse des eaux de surverse est joint en **Annexe 1**. Les méthodes analytiques utilisées sont rappelées dans cette annexe. Les analyses sont enregistrées dans le système de gestion (LIMS). Le tableau en annexe rappelle les codes LIMS pour référence ultérieure.

Site	Date	Conductivité					TAC-as-CaCO ₃ _mg/L
		µS/cm	Mg_mg/L	Mn_mg/L	SO4_mg/L	pH_	
EXS	12/01/2015	10 800	2570	178	8 030	7.3	32
EXS	03/02/2015	8 290	1280	80.9	8 660	6.3	26
EXS	10/02/2015	7 380	1610	20.2	7 650	7.6	42
EXS	17/02/2015	5 600	1020	6.1	4 260	7.7	33
EXS	03/03/2015	18 700	6180	296	24 600	6.6	79
EXS	12/03/2015	12 500	3160	170	15 000	7.5	49
EXS	25/03/2015	12 500	3280	146	14 000	7.7	36
EXS	01/04/2015	9 830	2440	114	10 500	7.4	--
EXS	08/04/2015	12 700	2700	108	15 000	7.4	--
EXS	13/04/2015	4 250	716	26.8	3 480	7.2	--
EXS	22/04/2015	16 700	4880	190	19 600	7.1	--
EXS	29/04/2015	17 500	4360	161	17 500	6.9	--
EXS	06/05/2015	3 650	412	17.6	2 670	6.9	16
EXS	21/05/2015	7 980	1850	57	7 970	7.4	24
EXS	03/06/2015	10 300	2620	79.2	10 200	7.1	25
EXS	09/06/2015	6 070	1160	43.8	5 400	7	20
EXS	17/06/2015	3 320	524	18.3	2 970	7	14
EXS	23/06/2015	5 200	828	28.8	4 060	7.6	19
EXS	01/07/2015	7 240	1570	33.4	6 770	7.1	23
EXS	09/07/2015	4 840	822	22.8	4 010	6.8	19
EXS	15/07/2015	6 990	1620	39.6	6 890	7.3	22
EXS	21/07/2015	4 920	786	15.5	3 770	6.7	15
EXS	31/07/2015	3 950	514	13.9	2 480	7.4	15
EXS	05/08/2015	3020	394	8.04	2480	6.8	12
EXS	15/09/2015	---	2040	54.2	9 500	6.5	63
EXS	28/10/2015	7030	1440	58.4	---	7	---

Tableau 19 : Analyses d'eau de surverse – Cellule exondée - Principaux paramètres

Site	Date	Conductivité				TAC-as-CaCO3	
		µS/cm	Mg_mg/L	Mn_mg/L	SO4_mg/L	pH_	mg/L
INS	03/03/2015	14 900	4300	146	17 500	7.1	56
INS	12/03/2015	13 400	3720	133	15 600	7.6	53
INS	25/03/2015	10 200	2460	88.4	10 700	7.8	36
INS	01/04/2015	10 000	2460	84.6	10 600	7.5	--
INS	08/04/2015	10 200	1740	55.6	11 300	7.4	--
INS	13/04/2015	4 270	718	18.7	3 010	7.5	--
INS	29/04/2015	6 390	1340	27.8	5 950	7.3	--
INS	06/05/2015	4 230	690	10.7	3 140	7.2	16
INS	13/05/2015	3 190	570	5.52	---	7.1	14
INS	21/05/2015	3 730	644	4.7	3 060	7.3	13
INS	27/05/2015	4 080	630	3.96	2 850	6.8	15
INS	03/06/2015	3 600	696	4.32	2 270	7.3	17
INS	09/06/2015	3 860	620	3.84	3 030	7.2	17
INS	17/06/2015	2 390	382	1.96	1 980	6.8	13
INS	23/06/2015	2 780	360	1.84	1 830	7.4	15
INS	01/07/2015	2 700	400	1.8	2 180	7	16
INS	09/07/2015	2 700	364	1.49	1 900	7.2	16
INS	15/07/2015	2 420	380	1.51	1 890	7.4	14
INS	21/07/2015	2 750	348	1.24	1 830	6.6	15
INS	31/07/2015	2 550	314	1.22	1 640	7.1	15
INS	05/08/2015	2 750	332	1.05	1 900	7	15
INS	15/09/2015	---	404	1.05	2 300	7.6	--
INS	28/10/2015	2 180	264	0.46	---	6.6	--

Tableau 20 : Analyses d'eau de surverse – Cellule inondée - Principaux paramètres

Les analyses de principaux paramètres (ACP) font apparaître les points suivants :

- le titre alcalimétrique complet (TAC) est homogène et faible, compris entre de 19 à 79 mg/l ;
- le pH est homogène et neutre (variations entre 6.7 et 7.4) pour les deux cellules ;
- la conductivité diminue progressivement et de manière nette pour la cellule inondée (passant de 15000 à la fin du remplissage à 2 180 µS/cm). Cette tendance à la diminution se retrouve, mais moins marquée, pour la cellule exondée
- sur la cellule inondée, la tendance très nette et continue à la baisse se retrouve pour les principaux anions/cations : magnésium (concentration passant de 4300 à 264 mg/l), manganèse (146 à 0,46 mg/l) et SO4²⁻ (17 500 à 2 300 mg/l). Sur la cellule exondée, la tendance à la baisse se retrouve mais elle est moins marquée, avec une plus forte variabilité des résultats.

Ces constats sont cohérents avec la configuration des cellules : l'eau de surverse de la cellule inondée correspond au surnageant dilué progressivement par l'eau de pluie. La surverse de la cellule exondée correspond à de l'eau s'écoulant en contact direct avec la surface de résidus, et aura donc une plus forte probabilité de se charger en éléments associés aux résidus.

 VALE VALE NC	Cellules d'essai du parc à résidus de la Kwé Ouest – Suivi 2014 à 2016	<i>Révision : 00</i> <i>2016-06-03</i>
	Suivi post-remplissage – Mai 2015 à Mai 2016	Page : 23 / 57

En plus des constats déjà mentionnés pour les principaux paramètres physico-chimiques et pour les anions majeurs, les analyses complètes ACS font apparaître les points suivants :

- pour tous les composés, les concentrations font apparaître une tendance à la baisse pour les eaux de surverse de la cellule inondée, et une tendance similaire mais moins marquée pour la cellule exondée
- les teneurs en soufre S sont initialement élevées pour les deux cellules (de l'ordre de 3 g/l), et passent progressivement à 500-700 mg/l pour la cellule inondée
- les teneurs en sodium Na sont faibles dès la fin du remplissage (30 mg/l) et passent à 10 mg/l sur la cellule inondée, et 15 à 25 mg/l sur l'exondée
- les teneurs en chlore Cl sont faibles dès la fin du remplissage (180 mg/l) et passent à 30 mg/l sur la cellule inondée, et 30 à 60 mg/l sur l'exondée
- les teneurs en silice SiO₂ ne montrent pas de tendance, elles restent faibles, comprises en 2,5 et 6 mg/l
- les teneurs en potassium, azote total, NO₃, PO₄ sont très faibles et le plus souvent inférieures aux limites de quantification ;
- pour la majorité des métaux, les concentrations sont inférieures aux limites de quantification. Les seuls métaux détectés sont le nickel (en très faibles concentrations, < 0,5 mg/l) et le Mn (en concentration plus forte mais diminuant progressivement).

5.2 ANALYSES CHIMIQUES DES RESIDUS - EAUX INTERSTITIELLES

Les analyses ont été réalisées par le laboratoire de VALE NC. Les méthodes analytiques utilisées sont identiques à celles utilisées pour les ACS. Ces analyses sont enregistrées dans le système de gestion (LIMS). Les résultats des analyses des eaux interstitielles sont joints en Annexe 2.

Les résultats mettent en évidence les points suivants :

- Les conductivités restent partout élevées (entre 6 et 13 mS/cm), ce qui est logique pour des eaux interstitielles directement en contact avec les résidus stockés ;
- Les concentrations les plus élevées correspondent à SO₄²⁻ (6 à 15 g/l), Mg (1,5 à 3,5 g/l), S (2 à 5 g/l). Le Fe n'est pas quantifié.
- Les concentrations en Cl (150 à 250 mg/l) et Na (10 à 20 mg/l) sont nettement plus basses, et pour tous les autres composés, les teneurs sont très faibles ou inférieures aux limites de quantification
- concernant les métaux, les teneurs sont très faibles ou inférieures aux limites de quantification pour l'ensemble des métaux, excepté le manganèse (teneurs fortes, entre 20 et 120 mg/l) et le nickel (teneurs faibles, entre 0,1 et 1,8 mg/l) ;

Il n'apparaît pas de contrastes marqués en fonction de la localisation (EXD, EXS, IND, INS) ou de la profondeur de la carotte analysée (0-1m, 1-2m, 2-3m) ni d'évolution significative dans le temps.

6 RESULTATS DES CARACTERISATIONS DE MATERIAUX - CAROTTAGES – JUIN 2015, SEPTEMBRE 2015 , AVRIL 2016

6.1 DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DES RESIDUS

Les rapports de l'UNC relatifs à la granulométrie laser et à la caractérisation minéralogique des résidus prélevés au cours du remplissage aux différentes profondeurs (100, 200, 300, 400) ont été présentés avec le rapport de suivi janvier-avril 2015. Les résultats sont rappelés ci-dessous pour référence. Le rapport relatif à la granulométrie laser et à la caractérisation minéralogique des résidus prélevés en juin 2015 est joint en Annexe 3.

Les distributions granulométriques (mesurées lors du dépôt) sont résumées dans le tableau suivant. Les valeurs dX correspondent au diamètre des particules représentant X% de particules observées. Par exemple, d90=20 µm signifie que 90% des particules ont un diamètre inférieur à 20 µm.

D'après ces analyses, le matériau est composé principalement de limon argileux très légèrement sableux. La granulométrie des résidus déposés dans la cellule inondée apparaît plus fine que pour la cellule exondée.

Echantillons	Date	d10 [µm]	d50 [µm]	d90 [µm]
IN400	12/01/2015	3.22	8.22	20.20
IN300	19/01/2015	3.02	8.32	25.15
IN200	10/02/2015	3.30	9.25	39.88
IN100	03/03/2015	3.46	15.12	76.85

Echantillons	Date	d10 [µm]	d50 [µm]	d90 [µm]
EX400	12/01/2015	4.83	11.01	23.00
EX300	19/01/2015	3.99	15.20	71.83
EX200	10/02/2015	3.27	10.40	68.93
EX100	03/03/2015	3.81	13.36	42.37

Tableau 21 : Principales valeurs de distribution granulométrique – Echantillons de résidus déposés aux profondeurs 100, 200, 300, 400 – Cellule inondée/exondée

Les carottes prélevées en juin et septembre 2015 ont fait l'objet d'une mesure de granulométrie avec des méthodes identiques. Les valeurs obtenues sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Emplacement	Campagne	Profondeur [m]	d10 [µm]	d50 [µm]	d90 [µm]
EXD	Juin 2015	0-1	2.45	63.3	243.9
EXD	Juin 2015	1-1.5	2.6	66.6	201.4
EXD	Juin 2015	1.5-2	3.6	72.3	183.7
EXD	Juin 2015	2-2.5	10.6	101.1	234.7
EXD	Juin 2015	2.5-3	3.9	96.2	241.4
EXD	Sept 2015	0-1	3.3	66.4	162.9
EXD	Sept 2015	1-1.5	2.2	20.5	111.3
EXD	Sept 2015	1.5-2	2.5	8	49.2
EXD	Sept 2015	2-2.5	1.5	5.7	43.1
EXD	Sept 2015	2.5-3	1.8	9.5	93.5
EXD	Avril 2016	0-1	3.3	13.5	76.1
EXD	Avril 2016	1-1.5	3.3	22.5	134.3
EXD	Avril 2016	1.5-2	3.3	16.8	116.8
EXD	Avril 2016	2-2.5	2.3	14.4	132.5
EXD	Avril 2016	2.5-3	4.0	73.0	197.7

Tableau 22 : Distribution granulométrique – Cellule exondée – Dépôt – juin 2015 à avril 2016

Pour la cellule exondée, la part de matériaux plus grossiers semble avoir sensiblement augmenté (diamètres d50 et d90 augmentés) au niveau de la zone de dépôt (EXD), et ce sur toute la colonne prélevée. Ce constat peut avoir deux origines : un entraînement des matériaux fins vers l'aval lors du dépôt (et donc augmentation de la proportion de matériaux grossiers), ou une modification des matériaux (modifications chimiques, agglomérats). Le constat est fait sur toute la colonne, ce qui exclut l'hypothèse d'un apport ponctuel de matériaux grossiers qui n'aurait pas été observé dans l'échantillonnage réalisé lors du dépôt.

Les distributions observées en septembre sur EXD sont très proches à celles de juin pour les carottes 0-1 m et 1-1,5. Par contre, pour les carottes plus profondes (1,5-2, 2-2,5 et 2,5-3), les courbes de granulométrie apparaissent modifiées avec des valeurs d50 nettement plus basses. Cette modification n'est pas expliquée. Elle se retrouve dans les carottes réalisées en avril 2016.

Emplacement	Campagne	Profondeur [m]	d10 [µm]	d50 [µm]	d90 [µm]
EXS	Juin 2015	0-1	2.6	7.3	32.9
EXS	Juin 2015	1-1.5	2.0	6.1	25
EXS	Juin 2015	1.5-2	2.0	6.5	29.9
EXS	Juin 2015	2-2.5	2.5	6.3	21
EXS	Juin 2015	2.5-3	1.9	5.3	17.1
EXS	Sept 2015	0-1	1.9	7.1	80.4
EXS	Sept 2015	1-1.5	1.4	4.9	26.6
EXS	Sept 2015	1.5-2	1.6	4.8	27.4
EXS	Sept 2015	2-2.5	1.5	5.2	32.1
EXS	Sept 2015	2.5-3	1.6	4.9	22.7
EXS	Avril 2016	0-1	1.6	5.2	28.7
EXS	Avril 2016	1-1.5	1.9	5.9	32.6
EXS	Avril 2016	1.5-2	2.0	6.1	21.2
EXS	Avril 2016	2-2.5	1.5	5.8	39.9
EXS	Avril 2016	2.5-3	1.2	4.3	23.9

Tableau 23 : Distribution granulométrique – Cellule exondée – Surverse – Juin 2015 à avril 2016

Vers la surverse de la cellule exondée (EXS), la proportion de matériaux très fins a légèrement augmenté par rapport aux valeurs constatées sur le résidu déposé (d10 passe de 3.5 à 1.5 µm, d50 passe de 12 à 5 µm), probablement lié à la sédimentation du résidu dans son parcours jusqu'à la surverse, induisant une classification des matériaux déposés.

Les valeurs restent stables entre juin 2015, septembre 2015 et avril 2016, sur toute la colonne (sauf en surface, résultat d90 de EXS qui est donc considéré comme douteux).

Emplacement	Campagne	Profondeur [m]	d10 [μm]	d50 [μm]	d90 [μm]
IND	Juin 2015	0-1	1.9	5.6	20.9
IND	Juin 2015	1-1.5	1.5	5.6	40.2
IND	Juin 2015	1.5-2	1.2	5.5	36.1
IND	Juin 2015	2-2.5	1.6	5.5	38.5
IND	Juin 2015	2.5-3	1.8	6.7	71.7
IND	Sept 2015	0-1	1.9	5.8	22.6
IND	Sept 2015	1-1.5	1.8	6.2	47.8
IND	Sept 2015	1.5-2	2	8	39.7
IND	Sept 2015	2-2.5	1.7	5.1	26.3
IND	Sept 2015	2.5-3	1.9	3.3	26.5
IND	Avril 2016	0-1	2.8	10.4	90.5
IND	Avril 2016	1-1.5	3.5	58.9	177.2
IND	Avril 2016	1.5-2	2.5	11.6	101.3
IND	Avril 2016	2-2.5	2.6	39.5	127.3
IND	Avril 2016	2.5-3	2.2	6.8	36.5

Tableau 24 : Distribution granulométrique – Cellule inondée – Dépôt – juin 2015 à avril 2016

Emplacement	Campagne	Profondeur [m]	d10 [μm]	d50 [μm]	d90 [μm]
INS	Juin 2015	0-1	1.98	7.5	48.1
INS	Juin 2015	1-1.5	2.1	6.5	27.6
INS	Juin 2015	1.5-2	1.6	5.8	33.2
INS	Juin 2015	2-2.5	1.5	4.8	23.2
INS	Juin 2015	2.5-3	1.6	4.4	18
INS	Sept 2015	0-1	2.2	6.6	30.3
INS	Sept 2015	1-1.5	2.1	6.9	36.9
INS	Sept 2015	1.5-2	1.9	6.8	28.6
INS	Sept 2015	2-2.5	1.7	5.5	34
INS	Sept 2015	2.5-3	1.4	4.9	22.5
INS	Avril 2016	0-1	2.2	7.4	43.8
INS	Avril 2016	1-1.5	1.6	5.3	22.1
INS	Avril 2016	1.5-2	2.0	6.7	44.5
INS	Avril 2016	2-2.5	2.6	6.1	18.6
INS	Avril 2016	2.5-3	1.8	5.4	21.1

Tableau 25 : Distribution granulométrique – Cellule inondée – Surverse - juin 2015 à avril 2016

Pour la cellule inondée, il ne semble pas y avoir eu de classification ou de modification des matériaux : les granulométries sont similaires entre zone de dépôt et zone de surverse, sont pratiquement constantes sur toute la colonne prélevée, et sont restées proches des valeurs observées dans les résidus déposés. Elles sont également stables entre juin 2015, septembre 2015.

 VALE VALE NC	Cellules d'essai du parc à résidus de la Kwé Ouest – Suivi 2014 à 2016	<i>Révision : 00</i> <i>2016-06-03</i>
	Suivi post-remplissage – Mai 2015 à Mai 2016	Page : 29 / 57

6.2 CARACTERISATION MINERALOGIQUE DES RESIDUS

Pour les analyses DRX, les prélèvements (juin 2015, septembre 2015, avril 2016) ont été séchés à 105°C. Les prélèvements lors du remplissage ont été testés à 2 températures : 60 et 105°, mais le séchage à 60° conduisant à masquer différentes phases en raison de la prédominance du gypse. Le séchage à 105°C pendant plusieurs heures permet de transformer le gypse en bassanite (sulfate de calcium hélio-hydraté, $2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), phase qui a l'intérêt, par rapport au gypse, de ne pas masquer les autres phases.

Pour mémoire, les six phases rencontrées lors du remplissage étaient (par ordre décroissant de présence) : (96-900-0140) Hematite, (00-071-1776) Alunite, (96-900-5522) Bassanite, (96-230-0259) Gypse, (96-901-3322) Quartz

Pour la campagne de juin 2015, les résultats sont similaires. Trois nouvelles phases ont été détectées : (96-901-6407) Goethite, (00-022-0711) Willemseite, (00-043-0605) Calcium Sulfate Hydrate.

Les résultats des campagnes suivantes (septembre 2015, avril 2016) montrent une certaine stabilité (par rapport à juin 2015) pour la présence des différentes phases en fonction de l'emplacement et de la profondeur des prélèvements.

Echantillon	Phases	Echantillon	Phases
EXD 0-1m	96-900-0140 (Hematite) 00-071-1776 (Alunite) 96-900-5522 (Bassanite) 96-901-3322 (Quartz) 96-901-6407 (Goethite) 00-043-0605 (Calcium Sulfate Hydrate) 00-022-0711 (Willemseite)	IND 0-1m	96-901-6407 (Goethite) 96-900-0140 (Hematite) 96-900-5522 (Bassanite) 00-071-1776 (Alunite) 00-022-0711 (Willemseite) 96-901-3322 (Quartz)
EXD 1-2m	00-071-1776 (Alunite) 96-900-5522 (Bassanite) 96-900-0140 (Hematite) 96-901-3322 (Quartz) 96-901-6407 (Goethite)	IND 1-2m	96-900-0140 (Hematite) 96-900-5522 (Bassanite) 00-071-1776 (Alunite) 00-022-0711 (Willemseite) 96-901-3322 (Quartz) 00-043-0605 (Calcium Sulfate Hydrate)
EXD 2-3 m	96-900-0140 (Hematite) 96-900-5522 (Bassanite) 00-071-1776 (Alunite) 00-043-0605 (Calcium Sulfate Hydrate) 96-901-3322 (Quartz)	IND 2-3m	96-900-0140 (Hematite) 96-900-5522 (Bassanite) 00-071-1776 (Alunite) 00-022-0711 (Willemseite) 96-901-6407 (Goethite)
EXS 0-1m	96-900-0140 (Hematite) 96-900-5522 (Bassanite) 00-071-1776 (Alunite) 00-043-0605 (Calcium Sulfate Hydrate) 96-901-3322 (Quartz) 00-022-0711 (Willemseite)	INS 0-1m	96-900-0140 (Hematite) 96-900-5522 (Bassanite) 00-071-1776 (Alunite) 00-022-0711 (Willemseite) 96-901-6407 (Goethite) 96-901-3322 (Quartz)
EXS 1-2m	96-900-0140 (Hematite) 96-900-5522 (Bassanite) 00-071-1776 (Alunite) 00-043-0605 (Calcium Sulfate Hydrate) 96-901-3322 (Quartz) 96-901-6407 (Goethite) 00-022-0711 (Willemseite)	INS 1-2m	96-900-0140 (Hematite) 96-900-5522 (Bassanite) 00-071-1776 (Alunite) 00-022-0711 (Willemseite) 96-901-6407 (Goethite) 96-901-3322 (Quartz)
EXS 2-3m	96-900-0140 (Hematite) 96-900-5522 (Bassanite) 00-071-1776 (Alunite) 00-043-0605 (Calcium Sulfate Hydrate) 00-022-0711 (Willemseite)	INS 2-3m	96-900-0140 (Hematite) 96-900-5522 (Bassanite) 00-071-1776 (Alunite) 00-022-0711 (Willemseite) 96-901-6407 (Goethite) 96-901-3322 (Quartz)

Tableau 26 : Phases détectées par analyse RX – Echantillons de résidus – EXD, EXS, IND, INS – profondeurs 0-1, 1-2 et 2-3m – Juin 2015

Echantillon	Phases	Echantillon	Phases
EXD 0-1m (Sept 2015)	96-900-0140 (Hematite) 00-071-1776 (Alunite) 96-900-5522 (Bassanite) 96-901-3322 (Quartz) 96-901-6407 (Goethite) 00-043-0605 (Clacium Sulfate Hydrate) 00-022-0711 (Willemseite)	IND 0-1m (Sept 2015)	96-901-6407 (Goethite) 96-900-0140 (Hematite) 96-900-5522 (Bassanite) 00-071-1776 (Alunite) 00-022-0711 (Willemseite) 96-901-3322 (Quartz)
EXD 1-2m (Sept 2015)	00-071-1776 (Alunite) 96-900-5522 (Bassanite) 96-900-0140 (Hematite) 96-901-6407 (Goethite) 00-043-0605 (Calcium Sulfate Hydrate) 00-022-0711 (Willemseite)	IND 1-2m (Sept 2015)	96-900-0140 (Hematite) 96-900-5522 (Bassanite) 00-071-1776 (Alunite) 00-022-0711 (Willemseite) 00-043-0605 (Calcium Sulfate Hydrate) 96-901-6407 (Goethite)
EXD 2-3 m (Sept 2015)	96-900-0140 (Hematite) 96-900-5522 (Bassanite) 00-043-0605 (Clacium Sulfate Hydrate) 96-901-6407 (Goethite)	IND 2-3m (Sept 2015)	96-900-0140 (Hematite) 96-900-5522 (Bassanite) 00-071-1776 (Alunite) 00-022-0711 (Willemseite) 96-901-6407 (Goethite) 00-043-0605 (Calcium Sulfate Hydrate)
EXS 0-1m (Sept 2015)	96-901-6407 (Goethite) 96-900-0140 (Hematite) 96-900-5522 (Bassanite) 00-043-0605 (Clacium Sulfate Hydrate) 00-022-0711 (Willemseite)	INS 0-1m (Sept 2015)	96-900-0140 (Hematite) 00-071-1776 (Alunite) 00-022-0711 (Willemseite) 96-901-6407 (Goethite) 00-043-0605 (Calcium Sulfate Hydrate)
EXS 1-2m (Sept 2015)	96-900-0140 (Hematite) 96-900-5522 (Bassanite) 00-071-1776 (Alunite) 00-043-0605 (Clacium Sulfate Hydrate) 96-901-6407 (Goethite) 00-022-0711 (Willemseite)	INS 1-2m (Sept 2015)	96-900-0140 (Hematite) 00-071-1776 (Alunite) 00-022-0711 (Willemseite) 96-901-6407 (Goethite) 00-043-0605 (Calcium Sulfate Hydrate)
EXS 2-3m (Sept 2015)	96-900-0140 (Hematite) 96-900-5522 (Bassanite) 00-071-1776 (Alunite) 00-043-0605 (Calcium Sulfate Hydrate)	INS 2-3m (Sept 2015)	96-900-0140 (Hematite) 00-071-1776 (Alunite) 00-022-0711 (Willemseite) 96-901-6407 (Goethite) 96-901-3322 (Quartz) 00-043-0605 (Clacium Sulfate Hydrate)

Tableau 27 : Phases détectées par analyse RX – Echantillons de résidus – EXD, EXS, IND, INS – profondeurs 0-1, 1-2 et 2-3m – Sept 2015

Echantillon	Phases	Echantillon	Phases
EXD 0-1m (Avril 2016)	96-900-0140 (Hematite) 00-071-1776 (Alunite) 96-900-5522 (Bassanite) 96-901-3322 (Quartz) 96-901-6407 (Goethite) 00-022-0711 (Willemseite)	IND 0-1m (Avril 2016)	96-900-0140 (Hematite) 00-071-1776 (Alunite) 96-900-5522 (Bassanite) 96-901-3322 (Quartz) 00-022-0711 (Willemseite)
EXD 1-2m (Avril 2016)	96-900-0140 (Hematite) 00-071-1776 (Alunite) 96-900-5522 (Bassanite) 96-901-3322 (Quartz) 00-022-0711 (Willemseite)	IND 1-2m (Avril 2016)	96-900-0140 (Hematite) 00-071-1776 (Alunite) 96-900-5522 (Bassanite) 96-901-3322 (Quartz) 96-901-6407 (Goethite) 00-022-0711 (Willemseite)
EXD 2-3 m (Avril 2016)	96-900-0140 (Hematite) 96-900-5522 (Bassanite) 96-901-3322 (Quartz)	IND 2-3 m (Avril 2016)	96-900-0140 (Hematite) 00-071-1776 (Alunite) 96-900-5522 (Bassanite) 96-901-3322 (Quartz) 00-022-0711 (Willemseite)
EXS 0-1m (Avril 2016)	96-900-0140 (Hematite) 00-071-1776 (Alunite) 96-900-5522 (Bassanite) 96-901-3322 (Quartz) 96-901-6407 (Goethite) 00-022-0711 (Willemseite)	INS 0-1m (Avril 2016)	96-900-0140 (Hematite) 00-071-1776 (Alunite) 96-900-5522 (Bassanite) 96-901-3322 (Quartz) 96-901-6407 (Goethite) 00-022-0711 (Willemseite)
EXS 1-2m (Avril 2016)	96-900-0140 (Hematite) 00-071-1776 (Alunite) 96-900-5522 (Bassanite) 96-901-3322 (Quartz) 96-901-6407 (Goethite) 00-022-0711 (Willemseite)	INS 1-2m (Avril 2016)	96-900-0140 (Hematite) 00-071-1776 (Alunite) 96-900-5522 (Bassanite) 96-901-3322 (Quartz) 96-901-6407 (Goethite) 00-022-0711 (Willemseite)
EXS 2-3m (Avril 2016)	96-900-0140 (Hematite) 00-071-1776 (Alunite) 96-900-5522 (Bassanite) 96-901-3322 (Quartz) 96-901-6407 (Goethite) 00-022-0711 (Willemseite)	INS 2-3m (Avril 2016)	96-900-0140 (Hematite) 00-071-1776 (Alunite) 96-900-5522 (Bassanite) 96-901-3322 (Quartz) 96-901-6407 (Goethite) 00-022-0711 (Willemseite)

Tableau 28 : Phases détectées par analyse RX – Echantillons de résidus – EXD, EXS, IND, INS – profondeurs 0-1, 1-2 et 2-3m – Avril 2016

Les analyses ont été réalisés sur les demi-carottes (hauteurs intermédiaires 1-1.5, 1.5-2, 2-2.5, 2.5-3), les phases retrouvées sont toujours cohérentes par carotte, par conséquent ce tableau présente les résultats par carotte uniquement (0-1, 1-2 et 2-3 m).

6.3 ESSAIS GEOTECHNIQUES SUR LES CAROTTES DE RESIDUS

6.3.1 ESSAIS REALISES (LABORATOIRE A2EP)

Les essais réalisés et les normes appliquées sont rappelés dans le tableau ci-dessous.

Ref	Description	Norme
GS	Masse volumique des particules solides des sols (pycnomètre)	NF P 94-054 (10/1991)
TE	Détermination de la teneur en eau pondérale	NF P94-050 (09/1995)
MVH	Masse volumique des sols fins Méthode de la trousse coupante, du moule, de l'immersion dans l'eau	NF P 94-053 (10/1991)
OE	Essai oedométrique - Essai de compressibilité sur matériaux fins quasi saturés avec chargement par paliers	XP P 94-090-1 (12/1997)

Tableau 29 : Essais géotechniques sur carottes et normes de référence - Juin 2015

Les essais ont été réalisés par le laboratoire A2EP de Nouméa pour les campagnes de juin 2015, septembre 2015 et avril 2016.

6.3.2 RESULTATS DES ESSAIS – GS, MVH, TE

Les procès-verbaux des essais GS, TE, MVH sont joints en Annexe 4.

La masse volumique des sols prend en compte l'ensemble du matériau, sans séchage préalable. La masse volumique des particules est obtenu après séchage au pycnomètre.

Les teneurs en eau TE correspondent à une teneur massique rapportée au poids sec de matériau : $W = (PH-PS)/PS$ (où PH est le poids humide et PS le poids sec). Les valeurs peuvent donc être supérieures à 100%, s'il y a en masse plus d'eau que de matériau sec, ce qui est souvent le cas pour les matériaux prélevés.

Les valeurs typiques de masses volumiques sont : sols à l'exception des minéraux : 2 600 à 3 000 kg/m³, gypse : < à 2 300 kg/m³, hématite : > à 5 000 kg/m³.

Site	Profondeur	Date Prélèvement	Echantillon	Masse volumique particules ρ_s GS (kg/m ³)	Masse volumique humide ρ_h MVH (kg/m ³)	Teneur en eau TE (%)
IND	0-1 m	09/06/2015	S15-53	2910	1560	115%
IND	1-2 m	09/06/2015	S15-54	3030	1650	122%
IND	2-3 m	09/06/2015	S15-55	3040	1900	73%
INS	0-1 m	09/06/2015	S15-56	2810	1850	195%
INS	1-2 m	09/06/2015	S15-57	3020	1460	157%
INS	2-3 m	09/06/2015	S15-58	2710	1880	128%
EXD	0-1 m	09/06/2015	S15-59	2480	1810	133%
EXD	1-2 m	09/06/2015	S15-60	2840	1840	80%
EXD	2-3 m	09/06/2015	S15-61	3090	1830	84%
EXS	0-1 m	09/06/2015	S15-62	3040	1810	137%
EXS	1-2 m	09/06/2015	S15-63	3060	1760	76%
EXS	2-3 m	09/06/2015	S15-64	2490	1780	81%

Tableau 30 : Résultats essais géotechniques (A2EP) sur les résidus – Juin 2015

Site	Profondeur	Date Prélèvement	Echantillon	Masse volumique particules ρ_s GS (kg/m ³)	Masse volumique humide ρ_h MVH (kg/m ³)	Teneur en eau TE (%)
IND	0-1 m	07/09/2015	S15-096	3000	1565	136%
IND	1-1.5 m	07/09/2015	S15-098	3040	1522	86%
IND	1.5-2m	07/09/2015	S15-098b	2930	1630	73%
IND	2-2.5 m	07/09/2015	S15-099	3060	1715	64%
IND	2.5-3 m	07/09/2015	S15-099b	3010	1680	81%
INS	0-1 m	07/09/2015	S15-092	3050	1525	136%
INS	1-1.5 m	07/09/2015	S15-093	3200	-	149%
INS	1.5-2m	07/09/2015	S15-095	3230	-	118%
INS	2-2.5 m	07/09/2015	S15-093b	2860	1533	121%
INS	2.5-3 m	07/09/2015	S15-095b	3400	1757	75%
EXD	0-1 m	08/09/2015	S15-104	3210	1670	82%
EXD	1-1.5 m	08/09/2015	S15-106	3150	1805	44%
EXD	1.5-2m	08/09/2015	S15-107	2600	1777	57%
EXD	2-2.5 m	08/09/2015	S15-106b	2930	1830	44%
EXD	2.5-3 m	08/09/2015	S15-107b	2880	1740	56%
EXS	0-1 m	08/09/2015	S15-100	3070	1522	91%
EXS	1-1.5 m	08/09/2015	S15-102	3320	1710	72%
EXS	1.5-2m	08/09/2015	S15-103	3260	1710	77%
EXS	2-2.5 m	08/09/2015	S15-102b	3230	1564	116%
EXS	2.5-3 m	08/09/2015	S15-103b	3130	1507	117%

Tableau 31 : Résultats essais géotechniques (A2EP) sur les résidus – Sept 2015

Site	Profondeur	Date Prélèvement	Echantillon	Masse volumique	Masse volumique	Teneur en
				particules ρ_s GS (kg/m ³)	humide ρ_h MVH (kg/m ³)	eau TE (%)
IND	0-1 m	04/04/2016	S16-30	2820	1365	149
IND	1-1.5 m	04/04/2016	S16-31 A	3170	1536	104
IND	1.5-2m	04/04/2016	S16-31 B	2830	1610	88
IND	2-2.5 m	04/04/2016	S16-32 A	3390	1729	61
IND	2.5-3 m	04/04/2016	S16-32 B	3410	1740	80
INS	0-1 m	04/04/2016	S16-033	3350	1384	45
INS	1-1.5 m	04/04/2016	S16-034 A	2830	1564	94
INS	1.5-2m	04/04/2016	S16-034 B	3060	1428	129
INS	2-2.5 m	04/04/2016	S16-35 A	3170	1471	100
INS	2.5-3 m	04/04/2016	S16-35 B	2590	1618	78
EXD	0-1 m	05/04/2016	S16-36	2570	1620	90
EXD	1-1.5 m	05/04/2016	S16-37 A	2590	1604	58
EXD	1.5-2m	05/04/2016	S16-37 B	2540	1780	56
EXD	2-2.5 m	05/04/2016	S16-38 A	2330	1630	65
EXD	2.5-3 m	05/04/2016	S16-38 B	2230	1740	41
EXS	0-1 m	05/04/2016	S16-039	2260	1487	88
EXS	1-1.5 m	05/04/2016	S16-040 A	2790	1690	94
EXS	1.5-2m	05/04/2016	S16-040 B	2990	1726	65
EXS	2-2.5 m	05/04/2016	S16-41 A	2250	1538	104
EXS	2.5-3 m	05/04/2016	S16-41 B	2210	1734	71

Tableau 32 : Résultats essais géotechniques (A2EP) sur les résidus – Avril 2016

Les masses volumiques des particules obtenues lors du remplissage étaient dans la gamme haute (entre 3300 et 4300 kg/m³), sachant que l'essai GS avait été réalisé avec un écart à la norme (étuvage à 105°, non recommandé par la norme pour les matériaux fins). Les masses volumiques des particules obtenues en juin et septembre 2015 sont plus basses, toutes dans la gamme 2500 – 3000 kg/m³. Les essais en juin et septembre ont été réalisés avec séchage à 50° (pycnomètre), strictement conforme aux recommandations à la norme. Les valeurs lors du remplissage et lors des essais ne sont pas directement comparables car le chauffage à 105° a pu conduire à une perte en eau structurelle pour le gypse. Aucune modification des résidus (évolution chimique, consolidation, stratification) ne viendrait justifier une variation de la masse volumique des particules.

Pour septembre 2015 et avril 2016, des splits ont pu être réalisés, de manière à obtenir des valeurs représentatives des profondeurs intermédiaires (1-1.5, 1.5-2, 2-2.5 et 2.5-3 m). Les valeurs varient généralement peu entre demi-carottes.

 VALE NC	Cellules d'essai du parc à résidus de la Kwé Ouest – Suivi 2014 à 2016	<i>Révision : 00</i> <i>2016-06-03</i>
	Suivi post-remplissage – Mai 2015 à Mai 2016	Page : 36 / 57

6.3.3 RESULTATS DES ESSAIS DE CONSOLIDATION OEDOMETRIQUE

Les procès-verbaux des essais OE sont joints en Annexe 5.

Site	Profondeur	Date Prélèvement	Echantillon	Cc	Cs	K (m/s)
IND	1-2 m	09/06/2015	S15-54	0.386	0.014	1.8E-10
INS	1-2 m	09/06/2015	S15-57	0.355	0.007	4.7E-10
EXD	1-2 m	09/06/2015	S15-60	0.550	0.023	5.8E-10
EXS	1-2 m	09/06/2015	S15-63	0.559	0.012	5.5E-10

Tableau 33 : Résultats essais oedométriques (A2EP) sur les résidus – Juin 2015

Site	Profondeur	Date Prélèvement	Echantillon	Cc	Cs	K (m/s)
IND	1-2 m	07/09/2015	S15-097	0.423	0.017	5.69E-10
INS	1-2 m	07/09/2015	S15-094	0.263	0.007	1.01E-09
EXD	1-2 m	08/09/2015	S15-105	0.235	0.006	5.69E-10
EXS	1-2 m	08/09/2015	S15-101	0.608	0.022	4.57E-10

Tableau 34 : Résultats essais oedométriques (A2EP) sur les résidus – Sept 2015

Site	Profondeur	Date Prélèvement	Echantillon	Cc	Cs	K (m/s)
IND	1-2 m	04/04/2016	S16-26	0.650	0.019	5.52E-10
INS	1-2 m	04/04/2016	S16-27	0.327	0.009	2.94E-09
EXD	1-2 m	05/04/2016	S16-28	0.200	0.010	3.48E-10
EXS	1-2 m	05/04/2016	S16-29	0.299	0.013	4.13E-10

Tableau 35 : Résultats essais oedométriques (A2EP) sur les résidus – Avril 2016

Cc est l'indice de compression, adimensionnel (en cours de chargement), Cs l'indice de décompression (même rapport, lors du retour au chargement initial).

L'interprétation des mesures a été effectuée sur la base d'une masse volumique des grains (ρ_s) de 2850 kg/m³. (valeur prise à 2700 kg/m³ pour les essais lors du remplissage). Les valeurs calculées ne sont pas modifiées par ce paramètre. Les essais ont été effectués sur des carottes avec un matériau encore fortement saturé en eau.

Les valeurs mesurées de l'indice de compression sont caractéristiques d'un matériau très compressible (seuil indicatif pour un matériau compressible : Cc > 0,2) et non gonflant.

Les valeurs de Cc semblent diminuer progressivement pour la cellule exondée (le matériau est de moins en moins compressible). Les valeurs de Cc restent dans une gamme haute pour le cellule inondée (0,4 à 0,6 au dépôt, 0,25 à 0,35 à la surverse), sans évolution nette dans le temps.

 VALE NC	Cellules d'essai du parc à résidus de la Kwé Ouest – Suivi 2014 à 2016	<i>Révision : 00</i> <i>2016-06-03</i>
	Suivi post-remplissage – Mai 2015 à Mai 2016	Page : 37 / 57

7 ESSAIS ET MESURES IN-SITU – MAI 2015 A MAI 2016

7.1 PRESSIONS INTERSTITIELLES

7.1.1 DONNEES ACQUISES PAR LES SONDES

Les données sont acquises en continu, à un pas de temps horaire, sur 16 zones : pour les deux cellules (inondée/exondée), sur les zones de dépôt et de surverse et pour 4 profondeurs.

Les valeurs mesurées lors du remplissage ont été présentées et commentées dans le rapport de suivi Janvier à Avril 2015.

Les graphes de mesures de pressions interstitielles et de température mesurées par les sondes de pression sont présentés en Annexe 6 et Annexe 7.

7.1.2 DONNEES DE PRESSION INTERSTITIELLE – CELLULE INONDEE

En zone de dépôt de la cellule inondée (IND) et en zone de sortie (INS), les pressions varient dans une plage restreinte, pilotées par le niveau d'eau dans la cellule qui revient rapidement au niveau du seuil déversoir après une pluie. L'évaporation ne se manifeste pas de manière visible dans les variations de niveau d'eau dans la cellule. Les variations de niveaux mesurées par les différentes sondes sont cohérentes entre elles (variations synchrones). Les seules exceptions sont :

La pression mesurée par la sonde IND275 baisse progressivement de mars à juin 2015. Elle se stabilise ensuite, à partir d'octobre 2015. *Nota : la sonde IND275 a donné des valeurs erratiques et non exploitables (donc invalidées) du 19/6 au 15/10/2015.*

La pression mesurée par la sonde INS350 augmente progressivement, de plus de 60 cm entre avril (pression < 3mCE) et début septembre (pression > 3,6 mCE), puis se stabilise ensuite. Il ne semble pas y avoir de justification simple (par exemple accumulation de résidus) pour une modification aussi importante.

7.1.3 DONNEES DE PRESSION INTERSTITIELLE – CELLULE EXONDEE

Sur la cellule exondée, en entrée comme en sortie, la pression mesurée diminue progressivement et de manière continue sur l'ensemble des sondes, à mesure de la cellule s'assèche.

Les pressions varient de manière synchrone pour toutes les sondes de la zone de dépôt EXD, et pour les trois sondes les plus profondes de EXS (niveaux 200, 275 et 350), avec une tendance progressive à la baisse (qui est cohérente avec l'assèchement du matériau : - 1,2 cm environ pour la sonde EXD entre le 1/4/2015 et le 1/2/2016).

A partir de mi-avril 2015, on observe des variations qui sont liées aux apports pluviométriques, même de faible intensité. Ces variations associées aux apports pluviométriques sont plus marquées pour la zone de dépôts, où le niveau des résidus est plus haut.

La pression diminue plus rapidement pour les sondes plus proches de la surface, ce qui est le comportement attendu. La pression mesurée par la sonde EXS125 diminue de manière plus marquée, ce qui est cohérent avec la position de cette sonde, proche de la surface, dans la zone la plus susceptible de s'assécher. Pour cette sonde, la pression devient négative à partir du 1^{er} décembre 2015.

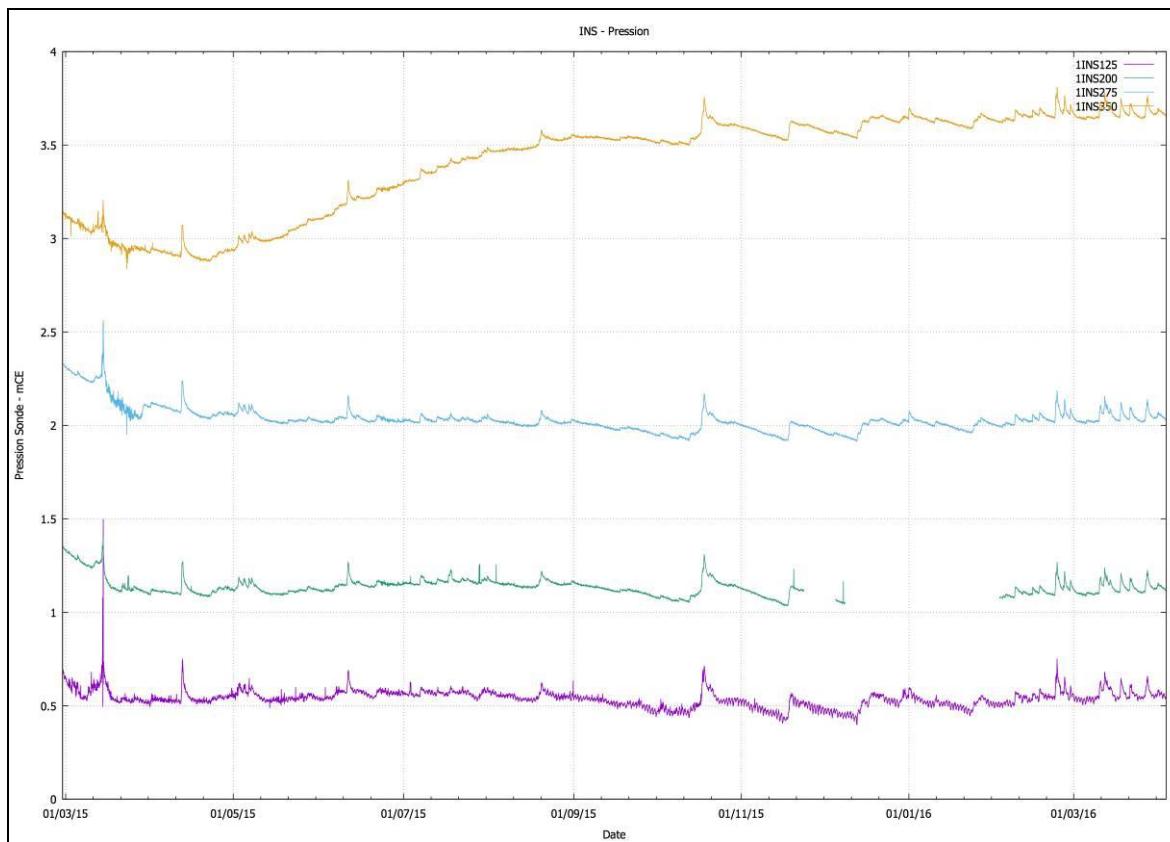
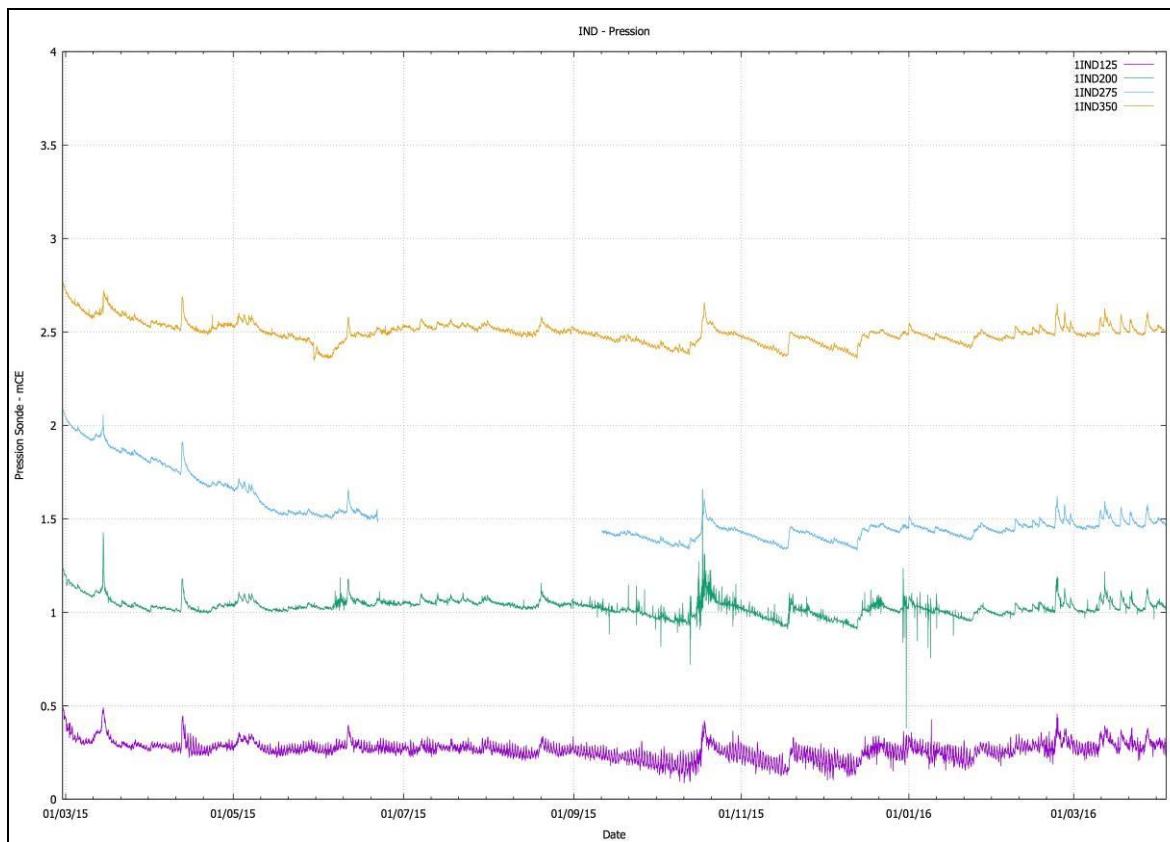
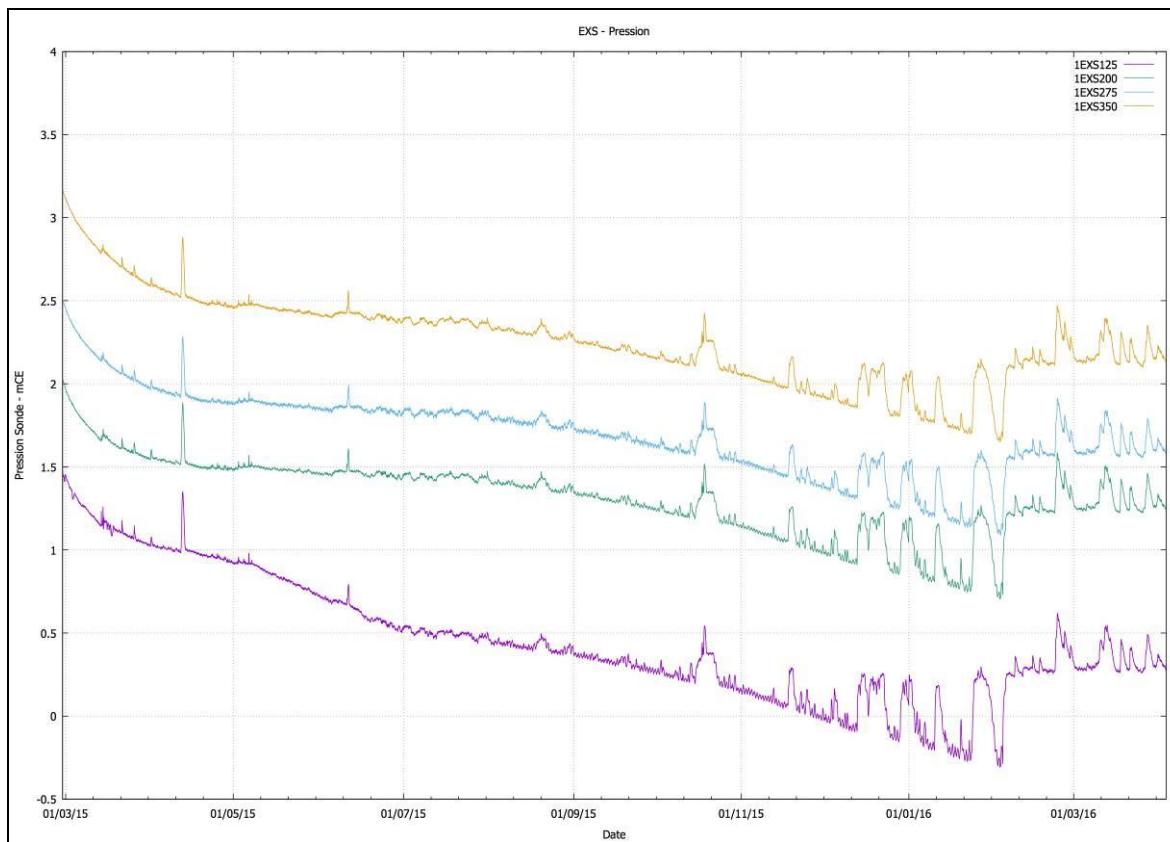
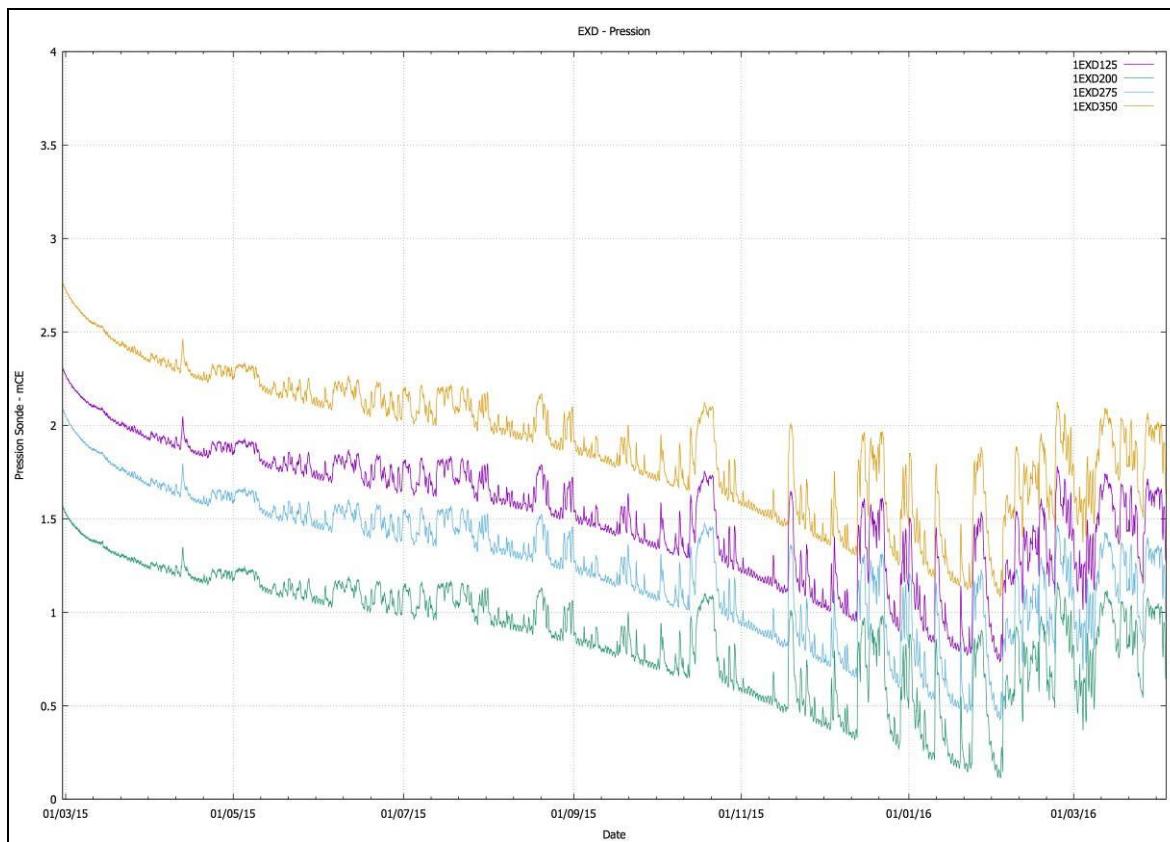
Figure 3 : Pressions interstitielles – Cellule Inondée


Figure 4 : Pressions interstitielles – Cellule Exondée


 VALE VALE NC	Cellules d'essai du parc à résidus de la Kwé Ouest – Suivi 2014 à 2016	<i>Révision : 00</i> <i>2016-06-03</i>
	Suivi post-remplissage – Mai 2015 à Mai 2016	<i>Page : 40 / 57</i>

7.1.4 DONNEES DE TEMPERATURE

Les températures varient de 23°C à 35°C, sauf au moment de apports, où la température a atteint jusqu'à 38°C.

Les mesures de température font apparaître une stratification des résidus au cours du remplissage, avec des températures des sondes du fond qui ne varient que peu dans le temps une fois ces niveaux recouverts par les apports successifs de résidus.

Les températures varient progressivement avec l'alternance des saisons et donc les variations de température de l'air ambiant, ce qui est attendu.

Les températures des sondes proches de la surface se sont refroidies plus rapidement après le remplissage et sont globalement plus faibles, ce qui est également attendu.

Les sondes proches de la surface, en particulier dans la cellule inondée, montrent des fluctuations de température importante (cycle journalier), en raison de leur exposition directe aux conditions climatiques (variations de la température de l'air et du rayonnement solaire, qui fait varier la température de l'eau surnageant dans la cellule inondée).

Ces variations sont beaucoup moins sensibles sur la cellule exondée, même pour les sondes proches de la surface. On peut supposer que le résidu asséché forme un écran avec une conductivité thermique plus faible que l'eau qui sature la cellule inondée.

Ainsi, dans la cellule exondée (EXD et EXS), les températures varient progressivement sans fluctuer fortement sur des pas de temps court. De même, la température des sondes profondes connaît une évolution graduelle.

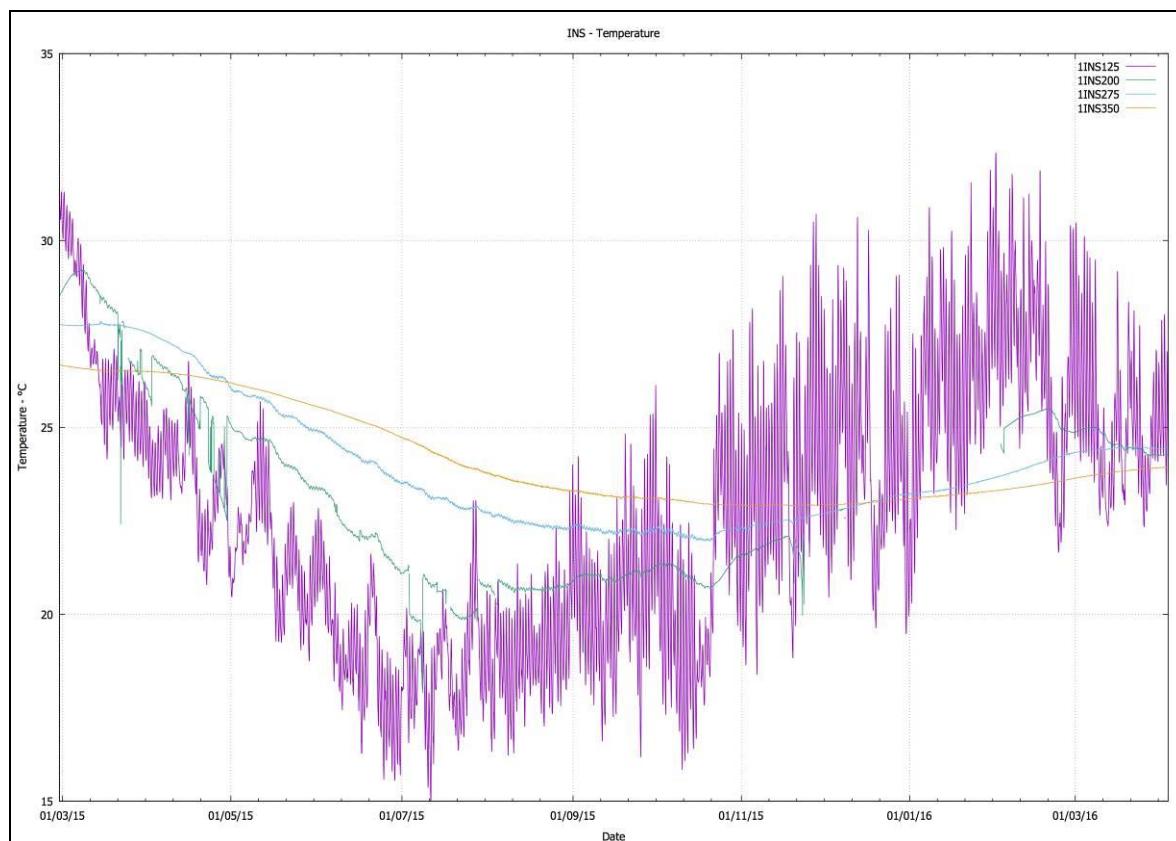
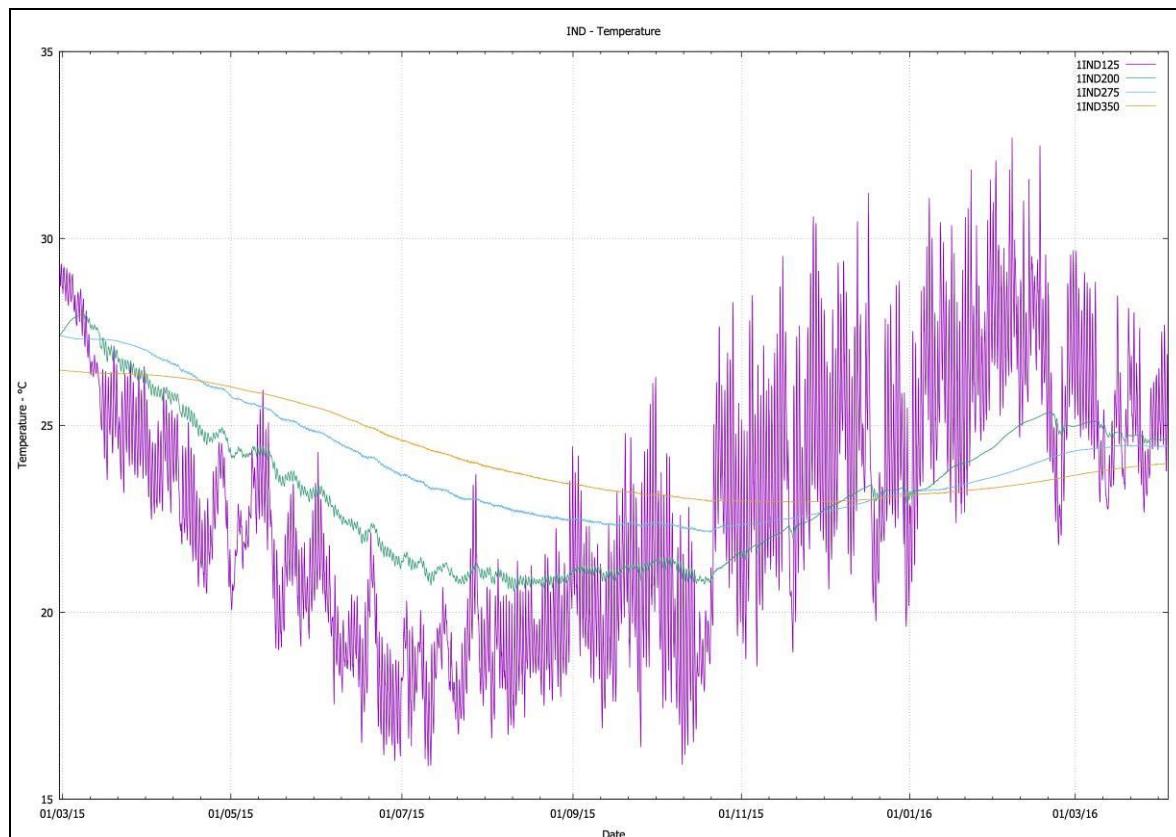
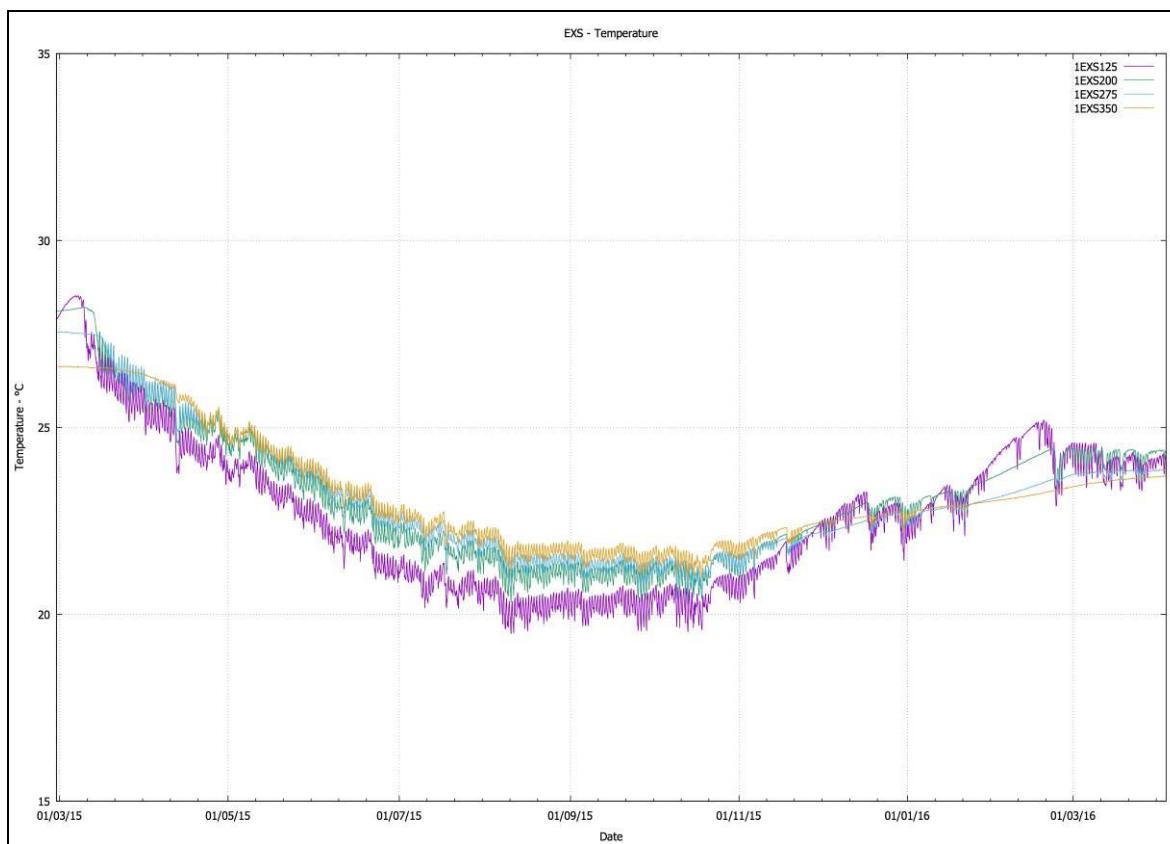
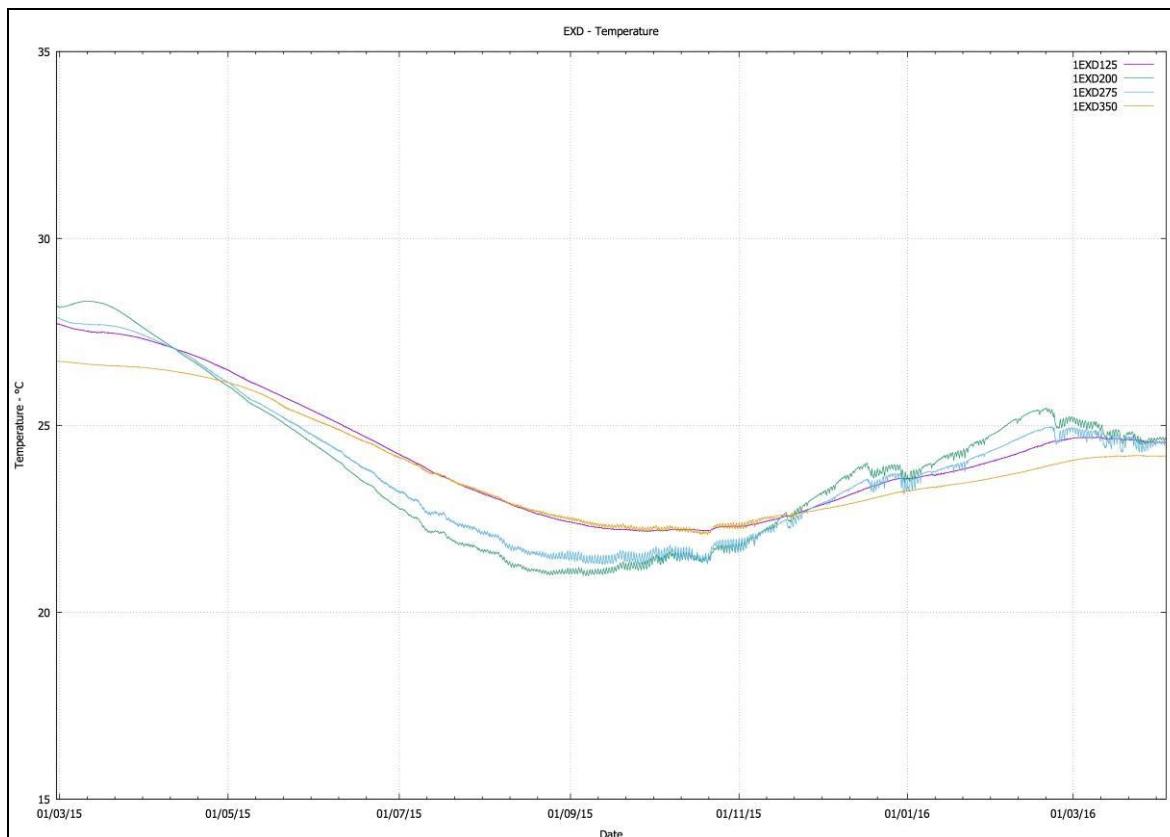
Figure 5 : Températures – Cellule Inondée


Figure 6 : Températures – Cellule Exondée



7.2 ESSAIS IN-SITU – RESISTANCE AU CISAILLEMENT

Des essais de résistance au cisaillement ont été réalisés, en utilisant le scissomètre Geonor 70.

Des mesures ont été réalisées le 10/6/2015, le 9/9/2015 et le 11/4/2016 sur 4 verticales, situées aux emplacements IND, INS, EXD, EXS.

Le très faible niveau de consolidation fait que la majorité des valeurs observées sont inférieures au seuil de précision (1ere graduation = 10 kPa) du dispositif employé (Geonor 70) en juin et septembre 2015.

Un scissomètre avec une plage de mesure beaucoup plus fine (Scissomètre Humboldt H-4227, palette large, plage de mesure 0 à 8kPa) a été utilisé pour la campagne d'avril 2016. Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau suivant.

Profondeur	0,50 m	1,00 m	1,50 m	2,00 m	2,50 m	3,00 m
IND	0.8	1.9	3.3	4.9	>8	>8
INS	0.1	0.6	1.1	1.1	>8	>8
EXD	4.0	5.0	> 8	5.3	5.6	> 8
EXS	1.3	3.3	3.9	3.8	3.6	>8

Tableau 36 : Mesures au scissomètre – Avril 2016 – Valeur de rupture en kPa

Les résultats montrent un couple avant rupture qui augmente avec la profondeur de mesure pour la cellule inondée, correspondant à une consolidation.

Pour la zone de dépôt de la cellule exondée, cette évolution avec la profondeur n'est pas manifeste, cela peut être lié à l'hétérogénéité du matériau au moment du dépôt.

 VALE NC	Cellules d'essai du parc à résidus de la Kwé Ouest – Suivi 2014 à 2016	<i>Révision : 00</i> <i>2016-06-03</i>
	Suivi post-remplissage – Mai 2015 à Mai 2016	Page : 44 / 57

7.3 ESSAIS IN-SITU – CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE

7.3.1 MODE OPERATOIRE

La conductivité hydraulique est mesurée par réalisation d'un choc hydraulique.

L'essai réalisé est non normé, il a été conçu en tenant compte des particularités du site et en s'appuyant sur les principes de la norme NF X30-425. Le choc hydraulique consiste à provoquer une variation instantanée de la pression à l'intérieur d'un piézomètre. En observant la réaction du niveau d'eau à l'intérieur du piézomètre, la conductivité hydraulique peut être déduite.

Dans le cas présent, la cellule de mesure est située devant la section crépinée de chaque piézomètre. L'application quasi instantanée de la charge est effectuée depuis les pontons flottants par ajout d'un volume d'eau (2,5 Litres). Cette variation de la charge constitue un choc (voir illustration ci-après d'où la désignation de l'essai (choc hydraulique). Ce test ne s'applique qu'à des sols saturés d'où l'intérêt d'utiliser cette méthode plutôt que proposée dans l'arrêté qui ne s'applique qu'aux sols non saturés.

Ces tests sont réalisés dans des couches géologiques de moyenne à faible perméabilité et fournissent des valeurs de la perméabilité représentatives de l'environnement immédiat du puits testé. Le résultat est donc très influencé par les conditions hydrauliques à proximité du puits.

Les variations du niveau piézométrique étant rapide, des sondes automatiques sont employées pour enregistrer les variations du niveau d'eau dans les piézomètres. L'hypothèse considérant que l'aquifère est homogène et d'épaisseur constante est généralement vérifiée en raison du faible rayon d'influence du test.

La solution analytique de Bouwer et Rice (1976)¹ est utilisée pour l'interprétation des tests (aquifère non confiné). Cette solution analytique suppose que l'eau et le sol sont incompressibles. L'interprétation des tests est effectuée avec le tableur développé par l'USGS (Halford et Kuniansky 2002) et permettant de mettre œuvre rapidement la solution analytique de Bouwer et Rice.

¹ Bouwer, Herman and R. C. Rice. 1976. A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. Water Resources Research, vol. 12, no. 3, pp. 423-428.

7.3.2 CARACTERISTIQUES DES PIEZOMETRES POUR LES ESSAIS

Les mesures de conductivité par choc hydraulique sont réalisées dans les 16 piézomètres installés lors du remplissage des cellules, aux emplacements suivants :

- Piézomètres de 63 mm de diamètre installés au niveau des 4 sites IND, INS, EXD, EXS
- crépinés sur une hauteur de 50 cm, prévus à 4 profondeurs différentes (la valeur correspond au niveau visé du bas de la crêpine par rapport à la surface de résidus) : 125, 200, 250 et 350 cm.

Code Piezomètre	Z haut crêpine [mNGNC]	Zrésidus au 10/6/2015 [mNGNC]	Z fond [mNGNC]	Epaisseur Résidus [m]	Profondeur Haut crêpine vs résidus [cm]
EXD125	244.59	243.77	240.44	3.33	-81
EXD200	243.70	243.77	240.44	3.33	7
EXD250	243.25	243.77	240.44	3.33	53
EXD350	243.24	243.77	240.44	3.33	53
EXS125	243.71	243.51	240.44	3.07	-20
EXS200	243.04	243.51	240.44	3.07	47
EXS250	242.28	243.51	240.44	3.07	123
EXS350	241.48	243.51	240.44	3.07	203
IND125	244.53	243.7	240.05	3.65	-83
IND200	243.60	243.7	240.05	3.65	10
IND250	243.01	243.7	240.05	3.65	69
IND350	242.17	243.7	240.05	3.65	153
INS125	243.83	243.32	240.05	3.27	-51
INS200	242.00	243.32	240.05	3.27	132
INS250	242.97	243.32	240.05	3.27	35
INS350	241.71	243.32	240.05	3.27	161

Tableau 37 : Piézomètres pour chocs hydrauliques – position crêpine/résidu

Les profondeurs effectives des crêpines sont liées à l'épaisseur de résidus déposée et à la position initiale des piézomètres.

Les piézomètres avec crêpine les plus proches de la surface (IND125, INS125, EXS125, EXD125) sont tous situés au-dessus du niveau des résidus, la mesure par choc hydraulique ne sera que partiellement exploitable. En outre, les piézomètres INS200 et EXS250 se sont déplacés lors du remplissage, et ne sont plus solidaires du résidu : les valeurs obtenues ne seront pas représentatives du milieu (espace entre le résidu et le tube). Ces piézomètres apparaissent en gris dans le tableau précédent.

Le piézomètre EXD350 a cassé lors de la pose et a dû être remplacé, mais le nouveau piézo n'a pas repris la position prévue (dépôt déjà présent en fond), la crêpine est donc située plus haut que prévu, et se retrouve alignée avec celle du piézomètre EXD250.

7.3.3 RESULTATS DES ESSAIS DE PERMEABILITE – JUIN 2015, SEPT 2015, AVR 2016

Les procès-verbaux et feuilles de calcul des essais sont présentés en Annexe 9.

Piezo	K (m/s) Juin 2015	K (m/s) Sept 2015	K (m/s) Avril 2016	Profondeur testée (cm)
EXD125	*	*	*	-81 à -31 cm
EXD200	2.9E-07	8.2 E-07	*	7 à 57 cm
EXD250	1.3E-07	1.8 E-06	2.9E-07	53 à 103 cm
EXD350	1.5E-05	9.1 E-06	8.8E-06	53 à 104 cm
EXS125	**	**	**	-20 à 30 cm
EXS200	3.5E-6	8.7 E-07	**	47 à 97 cm
EXS250	**	**	**	123 à 173 cm
EXS350	8.3E-05	3.1 E-05	**	203 à 253 cm
IND125	*	*	*	-83 à -33 cm
IND200	8.5E-06	5.1 E-06	7.2E-06	10 à 60 cm
IND250	4.6E-06	4.8 E-05	4.5E-05	69 à 119 cm
IND350	2.0E-06	1.3 E-06	1.3E-06	153 à 203 cm
INS125	3.8E-05*	3 E-06*	2.3E-06*	-51 à -1 cm
INS200	**	2 E-07	**	12 à 62 cm
INS250	2.2E-06	4.2 E-07	4.1E-08	35 à 85 cm
INS350	2.0E-06	7.2 E-07	1.1E-06	161 à 211 cm

Tableau 38 : Essais de perméabilité – Chocs hydrauliques – Résultats (Juin 2015, Sept 2015, Avr 2016)

* : essai non valide (crédine dénoyée)

** : Essai invalide : piézo non solidaire du résidu - l'eau remonte entre le résidu et le tube

En général, la charge induite par ajout d'un volume d'eau a été suffisante pour que le niveau piézométrique remonte jusqu'à la tête du piézomètre.

Les valeurs de perméabilité apparaissent généralement faibles, dans la gamme $1 \cdot 10^{-7}$ à $1 \cdot 10^{-5}$.

Pour EXD350 et EXS350, les conductivités plus élevées peuvent traduire une présence de sables plus importantes.

D'après l'analyse granulométrique, le résidu est constitué de limons argileux plus ou moins sableux, ce qui peut expliquer la variabilité spatiale des perméabilités du résidu selon les proportions de chacun des éléments présents.

 VALE	Cellules d'essai du parc à résidus de la Kwé Ouest – Suivi 2014 à 2016	<i>Révision : 00 2016-06-03</i>
	Suivi post-remplissage – Mai 2015 à Mai 2016	Annexes

ANNEXES

Annexe 1 : Analyses chimiques de l'eau de surverse – ACP/ACS – janvier à octobre 2015

Annexe 2 : Analyses chimiques de l'eau interstitielle – ACI – janvier à septembre 2015

Annexe 3 : Rapports UNC - Granulométrie Laser et caractérisation (analyse RX) des résidus – Juin 2015, Sept 2015, Avr 2016

Annexe 4 : Procès-verbaux – A2EP - Essais Géotechnique - Masse volumique humide (MVH), Teneur en eau (TE), Masse volumique particules solides (GS) – Juin 2015, sept 2015, Avr2016

Annexe 5 : Procès-verbaux – A2EP – Essais consolidation oedométrique (OE) – Juin 2015, septembre 2015, avril 2016

Annexe 6 : Mesures de pression interstitielle – IND, INS, EXD, EXS – fév. 2015 à mai 2016

Annexe 7 : Mesures de température – IND, INS, EXD, EXS – fév. 2015 à mai 2016

Annexe 8 : Procès-verbaux – A2EP – Mesures in-situ au scissomètre – Juin 2015, sept 2015, Avr 2016

Annexe 9 : Feuilles d'essai Perméabilité par chocs hydrauliques – A2EP – Juin 2015, sept. 2015, Avril 2016

 VALE	Cellules d'essai du parc à résidus de la Kwé Ouest – Suivi 2014 à 2016	<i>Révision : 00</i> <i>2016-06-03</i>
Suivi post-remplissage – Mai 2015 à Mai 2016		Annexes

Annexe 1 : Analyses chimiques de l'eau de surverse – ACP/ACS – janvier à octobre 2015

 VALE	Cellules d'essai du parc à résidus de la Kwé Ouest – Suivi 2014 à 2016	<i>Révision : 00</i> <i>2016-06-03</i>
	Suivi post-remplissage – Mai 2015 à Mai 2016	Annexes

Annexe 2 : Analyses chimiques de l'eau interstitielle – ACI – janvier à septembre 2015

 VALE	Cellules d'essai du parc à résidus de la Kwé Ouest – Suivi 2014 à 2016	<i>Révision : 00 2016-06-03</i>
	Suivi post-remplissage – Mai 2015 à Mai 2016	Annexes

**Annexe 3 : Rapports UNC - Granulométrie Laser et caractérisation (analyse RX) des résidus
– Juin 2015, Sept 2015, Avr 2016**

 VALE	Cellules d'essai du parc à résidus de la Kwé Ouest – Suivi 2014 à 2016	<i>Révision : 00</i> <i>2016-06-03</i>
	Suivi post-remplissage – Mai 2015 à Mai 2016	<i>Annexes</i>

**Annexe 4 : Procès-verbaux – A2EP - Essais Géotechnique - Masse volumique humide (MVH),
Teneur en eau (TE), Masse volumique particules solides (GS) – Juin 2015, sept 2015, Avr2016**

 VALE	Cellules d'essai du parc à résidus de la Kwé Ouest – Suivi 2014 à 2016	<i>Révision : 00 2016-06-03</i>
Suivi post-remplissage – Mai 2015 à Mai 2016		Annexes

Annexe 5 : Procès-verbaux – A2EP – Essais consolidation oedométrique (OE) – Juin 2015, septembre 2015, avril 2016

 VALE	Cellules d'essai du parc à résidus de la Kwé Ouest – Suivi 2014 à 2016	<i>Révision : 00</i> <i>2016-06-03</i>
	Suivi post-remplissage – Mai 2015 à Mai 2016	Annexes

Annexe 6 : Mesures de pression interstitielle – IND, INS, EXD, EXS – fév. 2015 à mai 2016

 VALE	Cellules d'essai du parc à résidus de la Kwé Ouest – Suivi 2014 à 2016	<i>Révision : 00 2016-06-03</i>
Suivi post-remplissage – Mai 2015 à Mai 2016		Annexes

Annexe 7 : Mesures de température – IND, INS, EXD, EXS – fév. 2015 à mai 2016

 VALE	Cellules d'essai du parc à résidus de la Kwé Ouest – Suivi 2014 à 2016	<i>Révision : 00 2016-06-03</i>
Suivi post-remplissage – Mai 2015 à Mai 2016		Annexes

**Annexe 8 : Procès-verbaux – A2EP – Mesures in-situ au scissomètre – Juin 2015, sept 2015,
Avr 2016**

 VALE	Cellules d'essai du parc à résidus de la Kwé Ouest – Suivi 2014 à 2016	<i>Révision : 00 2016-06-03</i>
	Suivi post-remplissage – Mai 2015 à Mai 2016	Annexes

Annexe 9 : Feuilles d'essai Perméabilité par chocs hydrauliques – A2EP – Juin 2015, sept. 2015, Avril 2016

Cellules d'essai du parc à résidus de la Kwé Ouest – Suivi 2014 à 2016

Révision : 00
2016-06-03

Suivi post-remplissage – Mai 2015 à Mai 2016

OBSERVATIONS SUR L'UTILISATION DU RAPPORT

Ce rapport, ainsi que les cartes ou documents, et toutes autres pièces annexées constituent un ensemble indissociable; en conséquence, l'utilisation qui pourrait être faite d'une communication ou reproduction partielle de ce rapport et annexes ainsi que toute interprétation au-delà des indications et énonciations de la société A2EP ne saurait engager la responsabilité de celle-ci.

Les conclusions du présent rapport sont valables pour une durée maximum de deux ans, sous réserve de l'absence de modifications ou travaux concernant la zone du projet ou ses voisins. Au-delà ou en cas de modifications ou travaux concernant la zone du projet ou ses voisins, nous vous recommandons de faire réaliser par un bureau d'étude spécialisé une mission visant à évaluer les éventuelles évolutions des conditions géologiques et environnementales et leurs conséquences sur le projet.