

EXPERTISE DES MATERIAUX DE LA FUTURE CARRIERE DE LA RAVINE DU TROU A LA REUNION

Rapport phase A



Expertise des matériaux de la future carrière de la Ravine du Trou pour la Nouvelle Route du Littoral à la Réunion

Rapport phase A

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
V0	14/12/2016	Version provisoire trame du rapport – note technique des modélisations
V1	09/01/2017	Version finale des modélisations (phase A de l'étude) sans la démonstration de l'exposition des matériaux 0/300mm (amortissement de l'onde harmonique dans l'ouvrage)

Affaire suivie par




Valéry LE TURDU - DLRCA – Infrastructures Durables et Matériaux / Gestion Durable des Ressources
<i>Tél. : 02 41 79 13 09</i>
<i>Courriel : valery.le-turdu@cerema.fr</i>
CEREMA Ouest

Références

N° d'affaire : C16OA0356

Maître d'Ouvrage : SCPR (Monsieur Sébastien LANGLOIS) et COLAS (Monsieur Jean-Luc GAUTIER)

Devis n° D16OA0356-1 du 05/10/2016

Rapport	Nom	Date	Visa
Établi par	Valéry LE TURDU	10/01/2017	
Contrôlé par	Sébastien BARLIER et Nicolas ROUXEL	10/01/2017	
Validé par	René-Henri MILIN	10/01/2017	

SOMMAIRE

1.	INTRODUCTION.....	4
2.	NOTE TECHNIQUE SUR L'APPLICATION DES MODELES DE DEGRADATION EN SERVICE DUE A L'USURE.....	5
2.1.	Méthode d'évaluation globale de la qualité de l'enrochement : paramètre AQD.....	8
2.2.	Les différentes caractéristiques (roche, localisation du site de l'ouvrage et enrochement) et leurs estimations.....	11
2.3.	Les différents modèles de dégradation en service due à l'usure et leurs représentations graphiques.....	14
2.3.1.	Le modèle M_{DE} et sa représentation graphique.....	15
2.3.2.	Le modèle AQD et sa représentation graphique.....	17
2.3.3.	Discussion à propos des modèles de dégradation en service due à l'usure suivant les deux approches MDE et AQD.....	17
3.	DECLINAISON DES MODELES DE DEGRADATION EN SERVICE DUE A L'USURE SUR LES MATERIEUX DE LA FUTURE CARRIERE DE LA RAVINE DU TROU A LA REUNION	19
3.1.	Matériaux LMB 1/500 kg.....	19
3.1.1.	Matériaux LMB 1/500 kg, influence des paramètres Bn, Cs et IC sur la dégradation en service due à l'usure.....	19
3.1.2.	Matériaux LMB 1/500 kg influence de la hauteur significative de la houle pour des périodes de retour 10 ans et 100 ans sur la dégradation en service due à l'usure.	22
3.1.3.	Matériaux LMB 1/500 kg influence de la zone de l'ouvrage.....	23
3.1.4.	Synthèse des matériaux LMB 1/500 kg.	23
3.2.	Matériaux HMA 200/1000 kg.	25
3.2.1.	Matériaux HMA 200/1000 kg influence des paramètres Bn, Cs et IC sur la dégradation en service due à l'usure.....	25
3.2.2.	Matériaux HMA 200/1000 kg influence de la zone de l'ouvrage.....	25
3.2.3.	Synthèse des matériaux HMA 200/1000 kg.	26
3.3.	Matériaux CP 0/300 mm.	28
3.3.1.	Matériaux CP 0/300 mm influence des paramètres Bn, Cs et IC sur la dégradation en service due à l'usure.....	28
3.3.2.	Cas A - LA = 35 et M_{DE} = 30.....	28
3.3.3.	Cas B - LA = 45 et MDE = 45.....	28
3.3.4.	Synthèse des matériaux CP 0/300 mm.	29
4.	CONCLUSIONS.....	31

1. INTRODUCTION

La société de Concassage et de Préfabrication de la Réunion (SCPR filiale du groupe COLAS), a sollicité le CEREMA Ouest afin qu'il puisse apporter une expertise sur les matériaux dédiés au projet de la Nouvelle Route du Littoral (NRL) issus du site de la future carrière de la Ravine du Trou. Cette expertise a fait l'objet d'une proposition technique et financière décomposée en trois phases distinctes :

- La phase A est principalement axée sur la modélisation de l'usure des matériaux LMB1/500 kg, HMA 200/1000 kg et CP0/300 mm en fonction des paramètres de dimensionnement tels que la hauteur significative de houle, les essais sur les matériaux, l'agressivité des agents climatiques.
- La phase B consiste à réaliser des essais sur des matériaux prélevés par carottage en différents endroits du site conformément aux normes en vigueur afin de pouvoir prendre en considération ces résultats d'essais dans les modélisations.
- La phase C est, quant à elle, dédiée à la remise d'un avis technique concernant le contenu de l'étude de gisement de la future carrière de la Ravine du Trou.

Le présent rapport rend compte de la phase A à l'exception de la vérification de l'exposition des matériaux du cœur de digue qui doit être complétée par une simulation des amortissements de houle. La phase B fait l'objet d'un rapport séparé. Enfin la phase C pourra être menée dans une phase ultérieure.

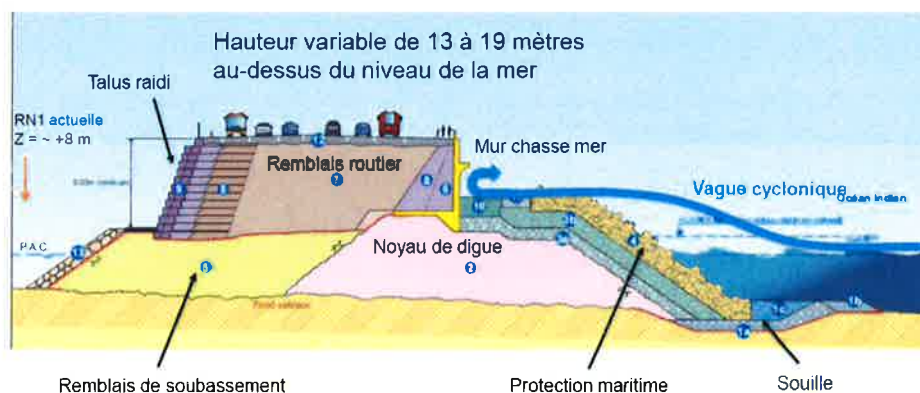


Figure 0 : Coupe digue NRL

Nb : Les expositions ne tiennent pas compte des ouvrages routiers supportés par la digue, ce qui est une hypothèse défavorable et va de ce point de vue dans le sens de la sécurité. Inversement, les interactions entre ces ouvrages routiers et la digue ne sont pas pris en compte, notamment pour l'évaluation de l'impact des tassements.

2. NOTE TECHNIQUE SUR L'APPLICATION DES MODELES DE DEGRADATION EN SERVICE DUE A L'USURE

Cette note technique présente comment les fiches de synthèse de durabilité ont été élaborées en prenant en compte la section 3.6.5 du chapitre 3 du Rock Manual de 2009.

La note va principalement décrire la fiche de synthèse et expliquer les différents modules nécessaires à son élaboration. La figure 1 présente une fiche de synthèse telle qu'elle est éditée lors des simulations.

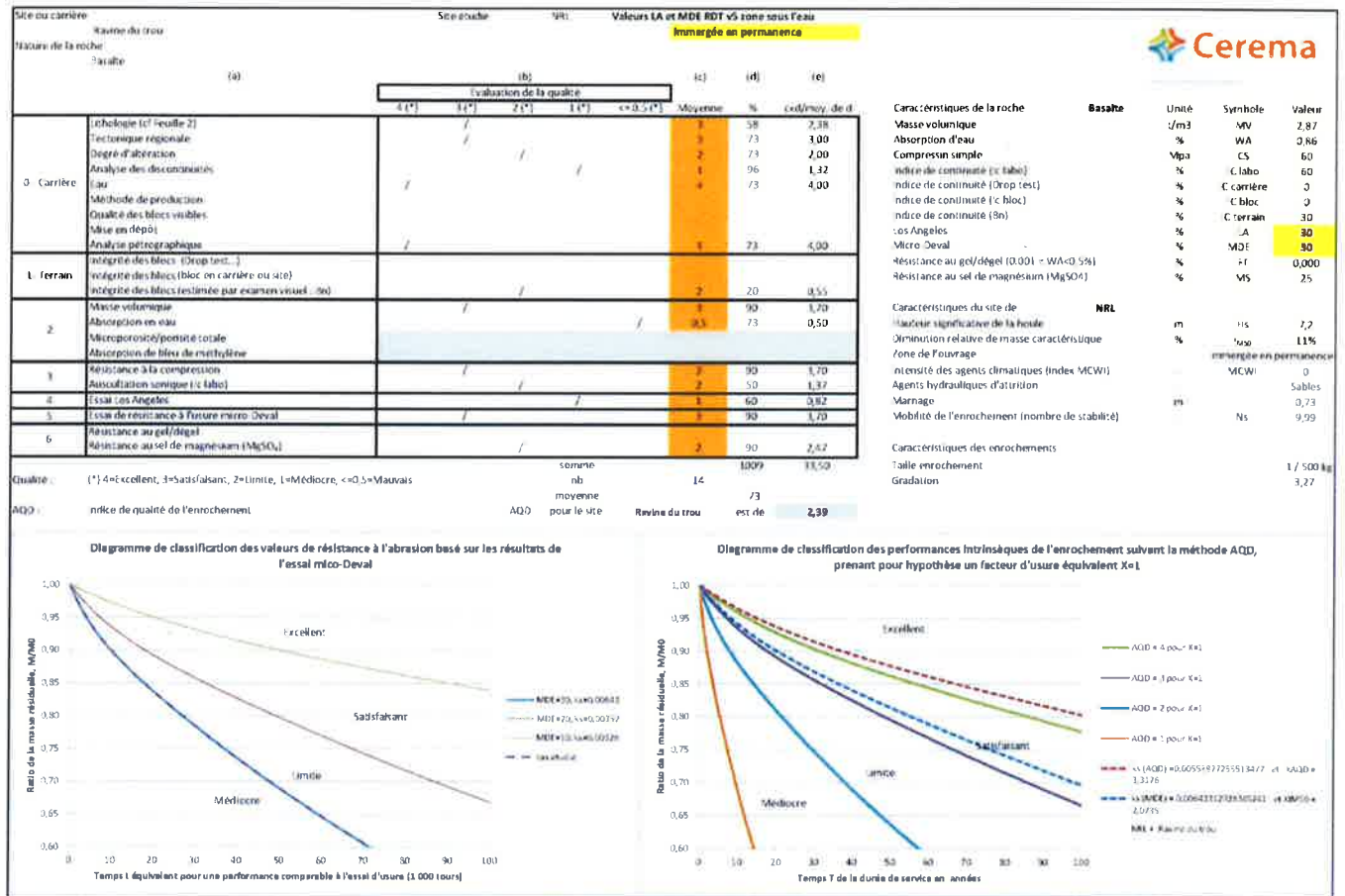


Figure 1 : Exemple d'une fiche de synthèse

La fiche de synthèse est organisée en quatre parties décomposées de la manière suivante :

- Un tableau encadré (figure 2 ci-dessous). Ce tableau est composé de sept grands thèmes décrivant de manière relativement exhaustive la carrière, les méthodes de production des enrochements et les résultats d'essais. De façon pragmatique, ce tableau traduit, via la description du gisement, la qualité de l'enrochement (AQD). Cet indice AQD sera décrit dans la deuxième partie de cette note.

	(a)	(b) Evaluation de la qualité					(c)	(d)	(e)	
		4 (*)	3 (*)	2 (*)	1 (*)	<= 0.5 (*)				
0 - Carrière	Lithologie (cf Feuille 2)	/					3	58	2,38	
	Tectonique régionale		/				3	73	3,00	
	Degré d'altération			/			2	73	2,00	
	Analyse des discontinuités				/		1	96	1,32	
	Eau	/					4	73	4,00	
	Méthode de production									
	Qualité des blocs visibles									
1- Terrain	Mise en dépôt									
	Analyse pétrographique	/					4	73	4,00	
2	Intégrité des blocs (Drop test...)			/			2	20	0,55	
	Intégrité des blocs (bloc en carrière ou site)			/						
	Intégrité des blocs (estimée par examen visuel : Bn)									
3	Masse volumique	/					3	90	3,70	
	Absorption en eau					/	0,5	73	0,50	
	Microporosité/porosité totale									
4	Absorption de bleu de méthylène									
	Résistance à la compression	/					3	90	3,70	
5	Auscultation sonique (Ic labo)			/			2	50	1,37	
	Essai Los Angeles				/		1	60	0,82	
6	Essai de résistance à l'usure micro-Deval	/					3	90	3,70	
	Résistance au gel/dégel			/			2	90	2,47	
	Résistance au sel de magnésium (MgSO ₄)									
Qualité :		(*) 4=Excellent, 3=Satisfaisant, 2=Limite, 1=Médiocre, <=0.5=Mauvais					somme nb	14	1009	33,50
AQD :		Indice de qualité de l'enrochement					AQD moyenne pour le site	Ravine du trou	est de	2,39

Figure 2 : Tableau présentant la carrière ou le gisement

- Trois listes de paramètres dont l'une est axée sur les caractéristiques de la roche, l'autre sur les paramètres de la localisation du site de l'ouvrage et la dernière reprend les caractéristiques des enrochements (voir figure 3).

Caractéristiques de la roche	Basalte	Unité	Symbole	Valeur
Masse volumique		t/m ³	MV	2,87
Absorption d'eau		%	WA	0,86
Compressin simple		Mpa	CS	60
Indice de continuité (Ic labo)		%	IC labo	60
Indice de continuité (Drop test)		%	IC carrière	0
Indice de continuité (Ic bloc)		%	IC bloc	0
Indice de continuité (Bn)		%	IC terrain	30
Los Angeles		%	LA	30
Micro-Deval		%	MDE	30
Résistance au gel/dégel (0.001 = WA<0.5%)		%	FT	0,000
Résistance au sel de magnésium (MgSO4)		%	MS	25
Caractéristiques du site de				
	NRL			
Hauteur significative de la houle		m	Hs	7,2
Diminution relative de masse caractéristique		%	I _{MS0}	11%
Zone de l'ouvrage			Immergée en permanence	
Intensité des agents climatiques (index MCWI)		-	MCWI	0
Agents hydrauliques d'attrition		-		Sablies
Marnage		m		0,73
Mobilité de l'enrochement (nombre de stabilité)		-	Ns	9,99
Caractéristiques des enrochements				
Taille enrochement				1 / 500 kg
Gradation				3,27

Figure 3 : Listes des paramètres de la roche et de la situation de l'ouvrage

- Deux graphiques (figure 4 – graphique de dégradation en service due à l'usure).

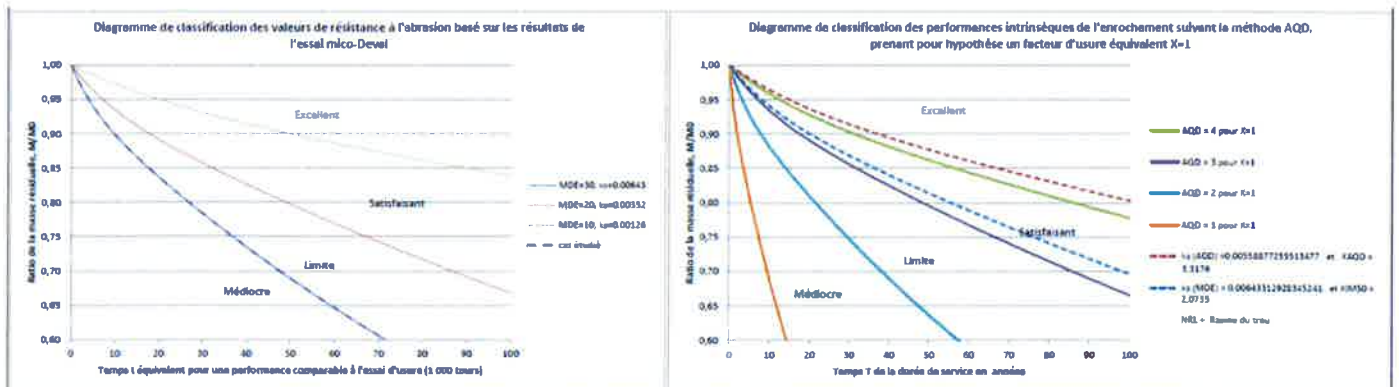


Figure 4 : graphiques de dégradation en service due à l'usure

Ces graphiques permettent de situer de façon visuelle, les performances d'un gisement en fonction du M_{DE} uniquement (graphique de gauche) et en fonction de l'AQD, du M_{DE} et de la situation du site (graphique de droite).

EXPERTISE DES MATERIAUX DE LA FUTURE CARRIERE DE LA RAVINE DU TROU A LA REUNION

Rapport phase A



2.1. Méthode d'évaluation globale de la qualité de l'enrochement : paramètre AQD.

La méthode consiste à évaluer trois catégories en affectant des notes (de 0,5 à 4) à différents paramètres. Les catégories sont la carrière, le terrain et les essais. Chacune des catégories est composée de plusieurs paramètres devant faire l'objet d'une notation. Le tableau ci-dessous présente le système de notation des paramètres.

4	Excellent
3	Satisfaisant
2	Limite
1	Médiocre
0,5	Mauvais

Tableau 1 : Notation des paramètres

La notation des paramètres peut se faire à la fois sur un aspect bibliographique et/ou documentaire et à la fois sur le terrain par des visites sur les carrières. Prenons, comme exemple, le paramètre de la tectonique régionale. Ce paramètre doit rendre compte de la probable (ou pas) fracturation du gisement par des failles majeures. Afin de répondre à cette question, l'étude détaillée de la carte géologique est bien évidemment la première méthode à mettre en œuvre. L'analyse de photographies aériennes (en stéréoscopie) peut être une solution complémentaire. Ces deux méthodes restent uniquement sur une approche documentaire. Il est aussi possible de déterminer la fracturation par un passage en carrière. La méthode de production des enrochements ainsi que la qualité visuelle des enrochements nécessitent obligatoirement une visite sur la carrière.

La figure 5 présente la méthodologie pour la notation du paramètre "lithologie" dans la fiche de synthèse. Dans notre cas d'étude, la nature de la roche est un basalte de densité $2,87 \text{ t/m}^3$. Cette roche doit être utilisée pour des enrochements situés en couche de filtre avec une blocométrie LMB 1/500 kg se rapportant à la classe des enrochements moyens.

C = Carapace GE = Gros Enrochements
 F = Filtre ME = Moyens Enrochements
 N = Noyau CP = Petits Enrochements

MV	Usage	Bloco
2,87	F	ME

Tableau 3.2 - Evaluation générale de l'utilisation de roche-non altérée dans les ouvrages hydrauliques

Roche		Carapace	Filtre	Noyau	Masse vol min	Masse Vol max	Blocométrie max	Forme	50% Test MV	30% Usage	20% Bloco	Synthèse Lithographie	
Magmatique	Branite	*	*	*	2,5	2,8	GE	Equidimensionnelle	####	4	4	4	4
	Diorite	*	*	*	2,6	3,1	GE	Equidimensionnelle	####	2	4	4	3
	Gabbro	*	*	*	2,8	3,2	GE	Equidimensionnelle	####	1	4	4	2,5
	Rhyolite	*	*	*	2,3	2,8	ME	Irrégulière à equidimensionnelle	####	4	4	4	4
	Andésite	*	*	*	2,4	3,1	ME	Equidimensionnelle	####	3	4	4	3,5
	Basalte	*	*	*	2,5	3,1	GE	Equidimensionnelle	####	2	4	4	3
Synénite	*	*	*	2,6	2,9	GE	Irrégulière à equidimensionnelle	####	3	4	4	3,5	
Sédimentaire	Quartzite	*	*	*	2,6	2,8	GE	Irrégulière à equidimensionnelle	####	4	4	4	4
	Grès	!	*	*	2,3	2,8	ME	Tabulaire	####	4	4	4	4
	Grès fin	!	!	*	2,3	2,8	ME	Tabulaire	####	4	2	4	3,4
	Schistes	!	!	*	2,3	2,7	ME	Tabulaire	####	4	2	4	3,4
	Calcaire	*	*	*	2,3	2,7	GE	Irrégulière à equidimensionnelle	####	4	4	4	4
	Craie	!	!	*	1,5	2,8	ME	Irrégulière à séquidimensionnelle	####	4	2	4	3,4
Métamorphique	Schistes ardoisiers	x	x	*	2,7	2,8	ME	Tabulaire	####	4	0	4	2,8
	Schistes sériciteux	x	x	*	2,3	2,7	ME	Allongée	####	4	0	4	2,8
	Schiste	!	!	*	2,7	3,2	ME	Allongée à tabulaire	####	2	2	4	2,4
	Gneiss	*	*	*	2,6	2,8	GE	Equidimensionnelle	####	4	4	4	4
	Marbre	*	*	*	2,7	2,8	GE	Equidimensionnelle	####	4	4	4	4
	Serpentinite	*	*	*	2,5	2,6	ME	Irrégulière	####	4	4	4	4
	Eclogite	*	*	x	3,3	3,6	GE	Irrégulière	####	0	4	4	2

* adapté
 ! sous réserve
 x inadapté

Note synthèse à renseigner en fonction de la nature pétrographique de la roche

Figure 5 : Tableau d'évaluation générale d'une roche non altérée dans les ouvrages hydrauliques

Il faut premièrement se référer à la ligne (surlignée) "basalte" du tableau 3.2 de la figure 5, dans le groupe de roche magmatique. Cette ligne montre que les basaltes sont adaptés pour des enrochements en carapace, en filtre ou en noyau. Les masses volumiques attendues dans ce type de formation varient entre 2,50 et 3,1 t/m3. Les blocométries qui peuvent être produites dans ce type de formation peuvent aller jusqu'aux Gros Enrochements (GE).

Afin de définir une cotation globale pour ce paramètre "Lithologie", une pondération des trois critères détaillés ci-dessus (à savoir masse volumique MV, Usage et Bloco) va être effectuée en appliquant respectivement 50% pour la masse volumique, 30% pour l'usage et 20% pour la blocométrie. Il faut noter que cette cotation est effective pour ce paramètre "Lithologie" et qu'un paramètre comme la masse volumique fera l'objet d'une nouvelle cotation dans la catégorie "Essais" où sa pondération sera augmentée à 90 %.

L'exemple de la notation de la masse volumique est intéressant car bien que la masse volumique soit supérieure à 2,60 t/m3 (valeur généralement retenue dans les CCTP) elle obtient une note de 2 (limite). Le tableau 2, ci-dessous, aide à comprendre la notation en utilisant des classes en fonction de la plage de variation de la masse volumique allant de 2,5 à 3,1 t/m3.

Si MV < 2,5 alors notation = 0 = mauvais pour ce type de roche
Si 2,5 < MV < 2,7 alors notation = 1 = médiocre pour ce type de roche
Si 2,7 < MV < 2,9 alors notation = 2 = limite pour ce type de roche
Si 2,9 < MV < 3,1 alors notation = 3 = satisfaisant pour ce type de roche
Si 3,1 < MV alors notation = 4 = excellent pour ce type de roche

Tableau 2 : Classes de notation de la masse volumique des basaltes

Les paramètres d'usage et de blocométrie ont été notés 4 (excellent). La note globale est calculée en multipliant la note de chaque paramètre par son coefficient de pondération en pourcentage. Dans notre cas :

$$\text{Note} = (2 \times 50\%) + (4 \times 30\%) + (4 \times 20\%) = 3.$$

MV Usage Bloco

Cette note est ensuite injectée dans la fiche de synthèse afin qu'elle fasse l'objet d'une nouvelle harmonisation par rapport à l'importance du critère avec : **essentielle** = plus de 90 ; **importante** = 80-90, **standard** = 70-80 ; **mineur** = 50-70 (colonne (d) en %).

Le tableau 3 ci-dessous, est fortement inspiré du tableau 3.12 du Rock Manual qui présente un guide pour l'évaluation de la qualité et de la durabilité de l'enrochement à partir d'évaluations sur site et de mesures en laboratoire. Le tableau 3 décline les principaux paramètres ayant trait à la catégorie « carrière » afin de leur attribuer une note.

	Excellent	Satisfaisant	Limite	Médiocre
	4	3	2	1
Tectonique régionale	Contrainte faibles, absence de plis ou de failles	Contraintes modérées, éventuellement épisodes sans contraintes	Fortes contraintes, présence éventuelle de fractures parallèles au front, induites par une relaxation des contraintes	Très fortes contraintes; présence éventuelle de failles sur le front de taille; présence éventuelle d'écaillage de roche au mur
Degré d'altération	IA - roche inaltérée	IB - Altération minimale (changement de couleur des surfaces principales)	II - Altération légère (changement de couleur présent sur la majeure partie du massif)	III - Altération modérée (moins de la moitié du massif est décomposée)
Analyse des discontinuités				
Eaux	Massif sec	Massif humide	Infiltration par les parois de la carrière	Ecoulement d'eau par les parois et accumulation au sol
Méthode de production	Pas d'abattage à l'explosif : par exemple pierre de taille	Tir spécial à rangée unique de trou; faible énergie de détonation, charge spécifique < 0.2 kg/m ³ ; diamètre du sondage d' ~ 75mm	Tir classique avec de l'ANFO; charge spécifique de 0.2 à 0.4 kg/m ³ ; diamètre du sondage d' ~ 100mm	Tir pour granulats avec, comme sous-produit, des enrochements de grandes dimensions; charge spécifique > 0.4 kg/m ³

Qualité des blocs visibles	<5% des blocs ont un LT>3; 95% des blocs sont de degré d'altération IA, exempts de cavité et extrêmement résistant	5-10% des blocs ont un LT>3; 95% des blocs sont de degré d'altération IB ou mieux, denses ou à drainage libre mais résistants	10-15% des blocs ont un LT>3; 95% des blocs sont au moins de degré d'altération II, soit microporeux soit dotés de cavités vides, résistants	> 15% des blocs ont un LT>3; 95% des blocs sont au moins de degré d'altération III, argileux ou micacés
Mise en dépôt	Les blocs sont stockés durant 3 mois en cure et pour permettre la relaxation des contraintes	Les blocs sont stockés pendant 2 mois	Les blocs sont stockés pendant 1 mois	Les blocs récemment abattus sont transportés directement sur le site pour être mis en œuvre
Analyse pétrographique	Roche saine, cristalline et roche fortement consolidée et compacte	Roche cristalline dolomitique et modérément consolidée	Schistes, phyllites, craie, marnes et roches contenant des minéraux argileux ou de la pyrite ou roches faiblement cimentées	Roche altérée, brèches et conglomérats

Tableau 3 : Grille d'évaluation et de notation pour la catégorie carrière

Une fois que l'ensemble ou une partie des paramètres des trois catégories ont fait l'objet d'une notation et d'une harmonisation, il est possible de calculer l'AQD de l'enrochement provenant de cette carrière ou du gisement. Plus l'AQD se rapproche de la note de 4 plus sa qualité est excellente (et inversement).

Dans notre cas, l'AQD est de 2,39 pour la qualité de l'enrochement provenant du gisement ou de la carrière.

2.2. Les différentes caractéristiques (roche, localisation du site de l'ouvrage et enrochement) et leurs estimations.

Cette partie de la note sera principalement consacrée à la description des caractéristiques concernant la localisation du site de l'ouvrage. En effet, les caractéristiques de la roche ainsi que des enrochements sont respectivement connues par les essais (évalués dans la partie carrière) et par les caractéristiques granulométriques ou blocométriques des enrochements (avec des critères calculés comme par exemple la gradation de l'enrochement $(M_{85}/M_{15})^{1/3}$ ou le D_{n50}).

Les paramètres décrivant le site et son exposition sont importants car ils vont être utilisés pour caler les modèles de dégradation en service due à l'usure. Les paramètres sont au nombre de dix.

La liste ci-dessous décrit brièvement les dix paramètres (K_s et X_1 à X_9) où :

- k_s = Résistance de la matrice rocheuse (M_{DE} ou AQD indice de qualité de l'enrochement).
- X_1 = taille de l'enrochement (M_{50} en m).
- X_2 = gradation $((M_{85}/M_{15})^{1/3})$.
- X_3 = forme initiale de l'enrochement (angulaire irrégulière à arrondie).
- X_4 = énergie de la houle ou du courant (Hauteur significative de la houle H_s (m)).
- X_5 = zone de l'ouvrage (intertidale... immergée).
- X_6 = intensité des agents climatiques (gel, dégel, précipitations, températures extrêmes...).
- X_7 = agents hydrauliques d'attrition (sable, sédiments... galets).
- X_8 = concentration de l'attaque de la houle (en fonction de la pente du projet).
- X_9 = mobilité de l'enrochement (calculé avec IM_{50} , H_s , D_{n50}).

La figure 6 présente une copie du tableau 3.14 du Rock Manual décrivant de manière détaillée les paramètres, leurs variations ainsi que leurs fiabilités.

Paramètre	Estimations de notation					Influence du paramètre $\lambda_{not} / \lambda_{ref}$	Fiabilité de calibrage °	
X_0	Résistance de la matrice rocheuse Utiliser la valeur de M_{25} et le rapport: $k_r = 4.12 \cdot 10^{-4} M_{25}^{1.0}$ ou la valeur d'AQD et le rapport: $k_r = 0.032 AQD^{2.0}$					-500	Excellent	
X_1	Taille Effort, obtenu par la formule $0.5(M_{25})^{0.5}$ (M_{25} en tonnes)					-10	Bonne	
	M_{25}	15.0	8.0	1	0.1			0.01
	Notation	1.23	1.00	0.50	0.23	0.11		
X_2	Gradation (M_{20}/M_{15}) ^{1/2}					-2.5	Satisfaisante	
		1.1 - 1.4		1.5 - 2.4	2.5 - 4.0			
	Notation	1.2		1.0	0.5			
X_3	Forme initiale					-2	Satisfaisante	
		Angulaire irrégulière	Blockiness élevé/équidimensionnelle	Semi-arrondie	Arrondie			
	Notation	1.00	1.10	1.50	2.00			
X_4	Energie de la houle incidente ou du courant (traités indépendamment de la taille de l'enrochement)					-10	Satisfaisante	
		Hauteur significative de la houle H_s (m)	> 8.0	4.0 - 8.0	< 4.0			
	Notation	Pour $\lambda_{50} > 15\%$	0.3	1.0	2.0			
		Pour $\lambda_{50} = 5.0-15.0\%$	0.5	1.3	2.3			
		Pour $\lambda_{50} = 2.0-5.0\%$	0.7	1.8	2.8			
Pour $\lambda_{50} < 2\%$		1.0	2.0	3.0				
Notation	Avec la méthode AQD	0.7	1.6	2.6				
X_5	Zone de l'ouvrage					-10	Bonne	
		intertidale	Supratidale / climat chaud	Supratidale / climat tempéré	immergées en permanence			
	Notation	1.0	2.5	8	10			
X_6	Intensité des agents climatiques (Utiliser l'index MCW de Lisbert - voir le Tableau 3.15)					-7	Bonne	
		Index MCW	< 100	100 - 300	300 - 600			> 600
	Notation	Pour $WA > 2.0\%$	0.8	0.8	0.4			0.2
		Pour $WA = 0.5-2.0\%$	1.0	0.8	0.6			0.4
Pour $WA < 0.5\%$		1.4	1.2	1.0	0.8			
Notation	Avec la méthode AQD	1.0	0.8	0.6	0.4			
X_7	Agents hydrauliques d'abrasion					-7.5	Médiocre	
	Type de sédiment	galets	graviers	sable	limon			-
	Notation	0.2	0.5	1.0	1.2	1.50		

Paramètre	Estimations de notation				Influence du paramètre X_{est}/X_{ref}	Fiabilité du calibrage *		
X_8	Concentration de l'attaque de la roue				-2	Satisfaisante		
	Marnage (m):							
		< 2.0	2.0 - 6.0	> 6.0				
	Notation pour un talus de pente 5/2 (ou plus raide)	1.0	1.2	1.5				
	Notation pour un talus de pente 3/1 (ou plus raide)	1.5	1.8	2.0				
X_9	Mobilité de l'enrochement				-20	Satisfaisante		
	$M_2/(AD_{rou})$							
		1 - 2.4	2.5 - 3.0	4 - 6.0			7 - 20	
	Notation	Pour $i_{DE0} > 15\%$	1.5	0.6			0.3	0.1
		Pour $i_{DE0} = 5.0 - 15.0\%$	2.0	1.0			0.5	0.2
		Pour $i_{DE0} = 2.0 - 5.0\%$	2.0	1.5			1.0	0.5
	Pour $i_{DE0} < 2\%$	2.0	1.8	1.8	1.4			
Notation	Avec la méthode AOD	1.5	1.3	1.1	0.7			

* Le calibrage des paramètres d'évaluation présente une fiabilité variable, allant d'un raisonnement simple comprenant des observations qualitatives sur l'influence des paramètres, effectuées sur le terrain (fiabilité médiocre) à des données de contrôle détaillées (excellente fiabilité).

Figure 6 : Tableau 3.14 extrait du Rock Manual

La caractérisation de ces différents paramètres permet d'établir un critère X qui sera pris en compte dans les modèles de dégradation en service due à l'usure décrits dans la partie suivante de la note. Pour information $X = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_8 X_9$.

2.3. Les différents modèles de dégradation en service due à l'usure et leurs représentations graphiques.

La modélisation des dégradations fait l'objet d'une section entière dans le Rock Manual. L'idée, ici, est de tenter de synthétiser la démarche suivie afin d'appliquer les modèles de prédiction de l'usure pour l'ouvrage considéré.

Il existe deux approches différentes : la première approche est basée préférentiellement sur la notion de M_{DE} (essai normalisé d'usure des granulats) et la deuxième approche est quant à elle axée sur la prise en compte de l'agressivité de l'environnement ainsi que l'application du dimensionnement.

2.3.1. Le modèle M_{DE} et sa représentation graphique.

La première étape consiste à transformer la valeur de l'essai M_{DE} en k_s où k_s (coefficient adimensionnel) représente la résistance de la matrice rocheuse avec :

$$K_s = 4.12 \cdot 10^{-5} M_{DE}^{1.485}$$

La seconde étape consiste à tracer la courbe du ratio de masse résiduelle M/M_0 en fonction du temps équivalent t (milliers de tours de broyeur) suivant l'équation ci-dessous :

$$M/M_0 = 0.05 \exp(-30 k_s t) + 0.95 \exp(-k_s t)$$

Où

M = masse résiduelle après le temps équivalent t (t) ou (kg).

M_0 = masse initiale (t) ou (kg).

La représentation graphique de cette équation est fournie dans la figure 7 ci-dessous qui fait partie intégrante de la fiche de synthèse (graphique en bas à gauche).

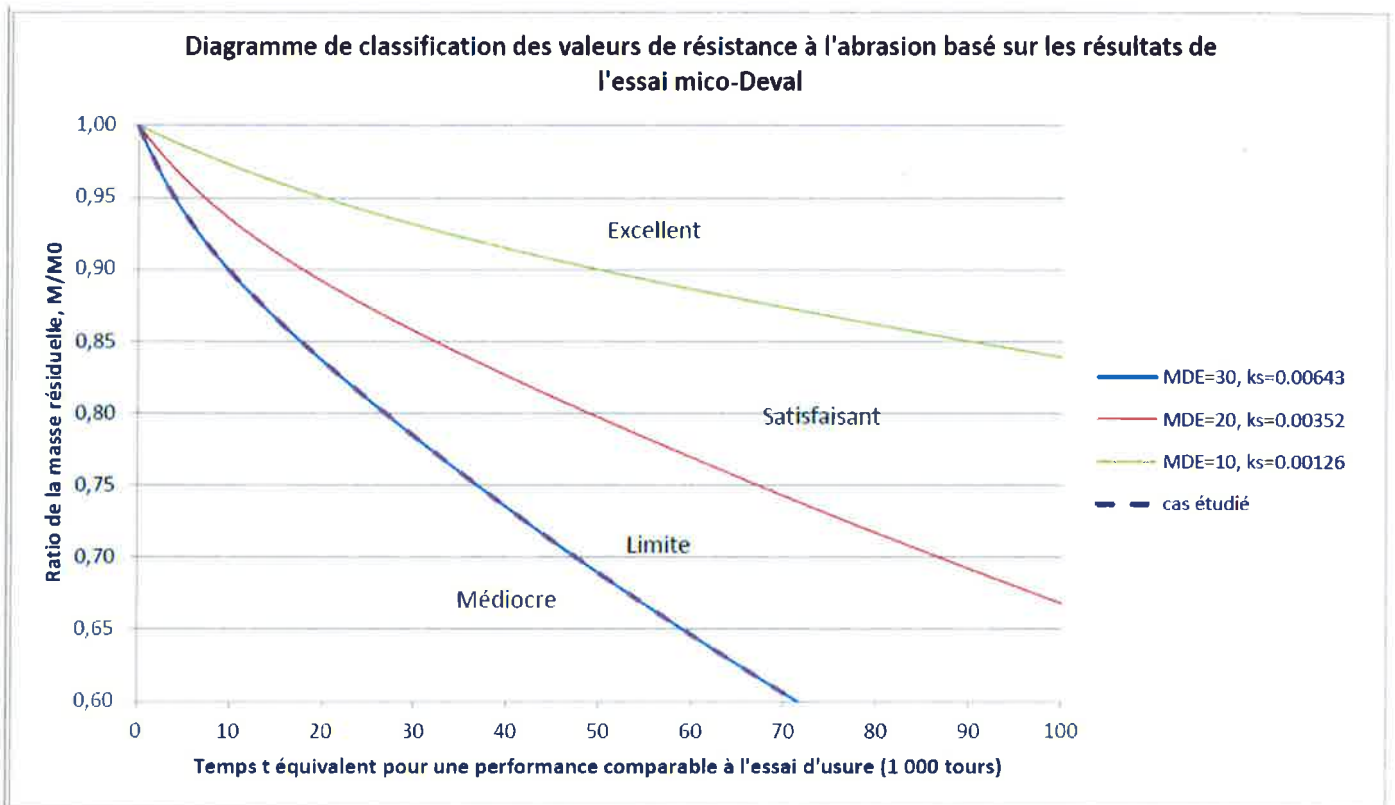


Figure 7 : Ratio de la masse résiduelle en fonction du temps équivalent t (milliers de tours de broyeur)

La courbe étudiée se situe sur exactement sur la courbe $M_{DE} = 20$, $k_s = 0,00352$ qui correspond à la séparation des domaines "Médiocre" et "Limite".

La dernière étape consiste à décliner ce modèle en fonction de l'agressivité du site afin de pouvoir évaluer une durée de service en années. L'équation permettant le tracé de cette courbe est la suivante :

$$M/M_0 = 0.05\exp[-30 (k_s / X)T] + 0.95\exp[(-k_s / X)T]$$

Où

M = masse résiduelle après un temps T.

M₀ = masse initiale.

T = années de vie de l'ouvrage.

X = facteur d'usure équivalent (détermination de l'agressivité du site) ici XIM₅₀.

La courbe représentant ce modèle est visible sur la figure 8 ci-dessous.

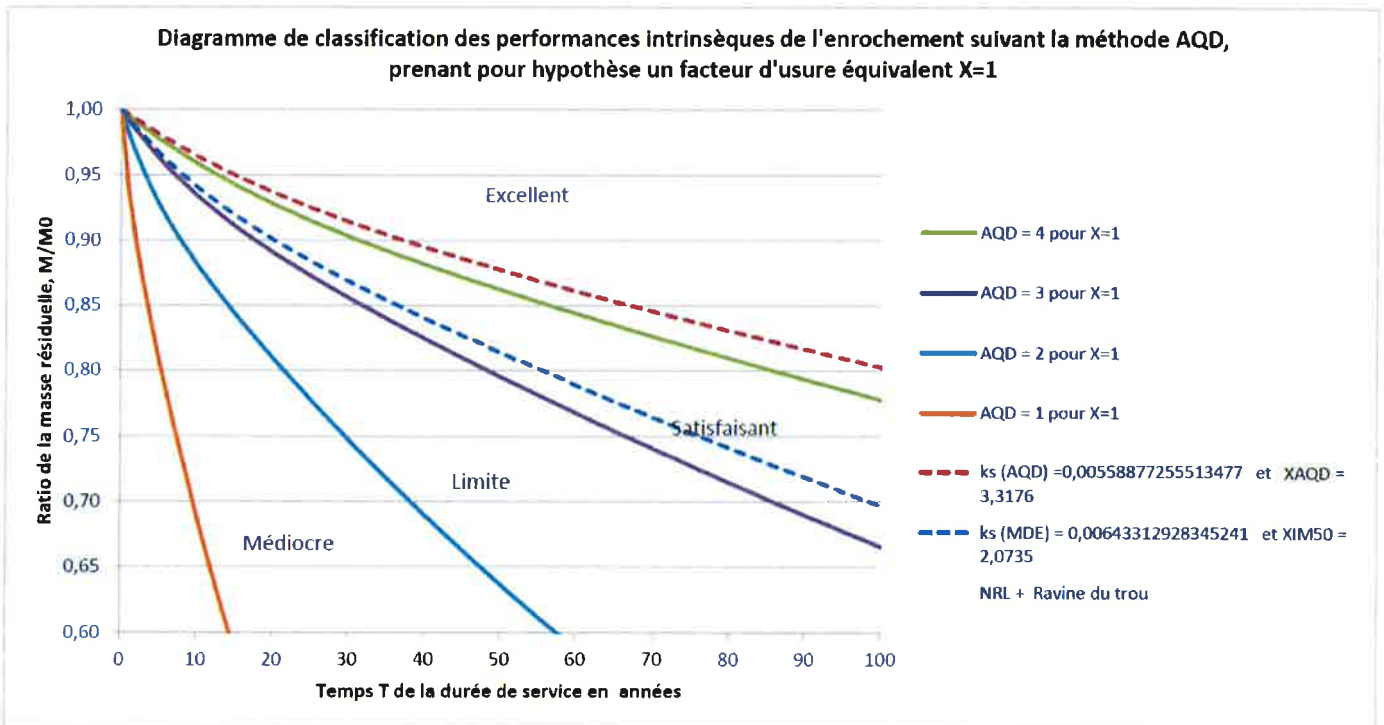


Figure 8 : Diagramme de classification des performances intrinsèques de l'enrochement suivant le modèle M_{DE} ; X en pointillé bleu

La courbe étudiée est dans le domaine "satisfaisant" et représentée par des pointillés bleus.

2.3.2. Le modèle AQD et sa représentation graphique.

Ce modèle prend en compte l'AQD déterminé lors de la phase de notation des paramètres des trois grandes catégories (carrière, terrain et essais). Cette méthode tente d'évaluer la baisse des performances à l'aide d'un coefficient représentant à la fois l'agressivité et l'application du dimensionnement. Ce coefficient est donc global et contrairement au premier modèle indépendant de la propriété intrinsèque globale déterminée par la méthode M_{DE} .

De la même manière que le premier modèle, l'étape 1 consiste à convertir l'AQD en k_s à l'aide de l'équation suivante :

$$K_s = 0.032 \text{ AQD}^{-2.0}$$

Les courbes de références AQD (de 1 à 4) sont représentées sur la figure 8 (ci-dessus) avec un facteur d'usure équivalent $X = 1$.

La courbe $k_s ; X \text{AQD}$ est tracée selon le même modèle (exponentielle négative) prenant en compte l'agressivité du site afin de pouvoir évaluer une durée de service en années. L'équation permettant le tracé de cette courbe est la suivante :

$$M/M_0 = 0.05 \exp[-30 (k_s / X)T] + 0.95 \exp[(-k_s / X)T]$$

Où

M = masse résiduelle après un temps T .

M_0 = masse initiale.

T = années de vie de l'ouvrage.

X = facteur d'usure équivalent (détermination de l'agressivité du site) ici $X \text{AQD}$.

La courbe étudiée est dans le domaine "excellent" et représentée par des pointillés rouges.

2.3.3. Discussion à propos des modèles de dégradation en service due à l'usure suivant les deux approches MDE et AQD

Il semblerait que le modèle basé sur l'essai M_{DE} soit probablement mieux calibré que le modèle AQD (du fait de retour d'expérience des essais M_{DE} sur granulats). Néanmoins le modèle AQD présente l'avantage de prendre en compte plus de facteurs et notamment de pouvoir par le biais d'évaluations de paramètres (carrière, gisement et essais) fournir ou tenter de fournir un indicateur de la qualité de l'enrochement. De plus, ces modèles basés sur la prise en compte de l'agressivité du site permettent d'appréhender l'usure des matériaux en fonction des conditions extérieures (et pas uniquement au travers d'un essai).

Le CEREMA attire l'attention sur le fait que les modèles fournissent des ordres de grandeur de dégradation et qu'il est difficile de vérifier avec exactitude les durées prédites. L'intérêt de ces modèles est de pouvoir comparer de façon relative les solutions techniques proposées ainsi que de pouvoir appréhender l'influence de la variation d'un ou plusieurs paramètres sur le résultat de durabilité de l'ouvrage.

Enfin la durabilité des matériaux dans l'ouvrage dépend bien évidemment de leurs performances mais aussi de leur position dans l'ouvrage. En effet, dans la section 3.6.2 le Rock Manual distingue bien les caractéristiques des matériaux en carapace ou en sous-couche de celles des matériaux du noyau. Ainsi il est noté que *"les matériaux de qualité médiocre présentant une faible résistance à l'altération peuvent résister parfaitement dans les environnements modérés, avec une exposition réduite aux conditions climatiques, et en présence d'agents de dégradation quasiment inexistantes, par exemple dans la partie du noyau d'une digue imperméable immergée en permanence"*.

3. DECLINAISON DES MODELES DE DEGRADATION EN SERVICE DUE A L'USURE SUR LES MATERIEUX DE LA FUTURE CARRIERE DE LA RAVINE DU TROU A LA REUNION

Une déclinaison des modèles a été effectuée pour chacun des matériaux suivants : LMB 1/500kg (noyau), HMA 200/1000kg (sous-couche de carapace) et CP 0/300 mm (remblais de soubassement).

3.1. Matériaux LMB 1/500 kg.

3.1.1. Matériaux LMB 1/500 kg, influence des paramètres Bn, Cs et IC sur la dégradation en service due à l'usure.

Concernant les matériaux LMB 1/500kg, les hypothèses de travail et les paramètres de calage des modèles sont les suivants :

Pour la catégorie carrière :

- La présence d'eau et la pétrographie sont classées "excellent".
- La lithologie et la tectonique régionale sont classées "satisfaisant".
- Le degré d'altération est classé "limite".
- L'analyse des discontinuités est classée "médiocre".

Pour la catégorie essais :

- Masse volumique de la roche = 2,87 t/m³ (Colas) à 2,90 t/m³ (CEREMA).
- Coefficient d'absorption d'eau = 0,87 % (Colas) et 0,90 % (CEREMA).
- Los Angeles et M_{DE} sont pris à 30 et 30 (spécifications du CCTP).
- Résistance à la cristallisation du sel de magnésium = 25 % (COLAS).

Pour la catégorie localisation du site et son environnement :

- La hauteur significative de la houle H_s (m) est fixée à 2,00 m. Cette valeur est déduite de la bouée N° 97404 - Pointe du Gouffre (voir figure 9 ci-dessous).



97404 - Pointe du Gouffre

Caractéristiques générales

Période de mesure :

du 15/05/2000 au 02/01/2013

Durée effective : 10.01 ans

Latitude : 20°51,830'S

Longitude : 55°23,750'E

Profondeur : 31 m

Distance à la côte : 1.8 km

Marnage VEM : 0.65 m

Matériel :

Type : Bouée

Réf : Datawell Non Directionnelle



CEREMA / DTecEMF / DI / IE / IHS / PDH

07/02/14

Climatologie moyenne

Corrélogramme - H_{m0}/T_p (%)

H_{m0} (m)	T_p (s)																														Tot	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
0.5		0.04	0.09	0.1	0.1	0.8	1.7	1.1	1.7	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5	0.6		0.09			0.02												9.0
1			0.03	0.8	2.8	2.2	1.1	2.2	1.1	1.1	4.9	2.1	1.1	2.1	2.4		0.9						0.007	0.01								70.6
1.5				0.03	0.2	0.9	4.1	2.6	4.5	2.0	1.7	0.7	0.2	0.2	0.3		0.3			0.1			0.009	0.007				0.003	0.004			17.8
2						0.007	0.1	0.2	0.5	3.2	0.2	0.1	0.05	0.01	0.01		0.02			0.03			0.007					0.007				1.4
2.5							0.008	0.02	0.1	0.07	0.07	0.07	0.05	0.03	0.01		0.003						0.004									0.4
3								0.004	0.01	0.02	0.05	0.03	0.04	0.01	0.005																	0.2
3.5									0.003	0.009	0.01	0.02	0.02	0.04	0.02	0.007																0.1
4										0.001	0.006	0.003	0.02	0.03	0.02	0.003																0.06
4.5												0.002	0.007	0.02	0.02	0.002																0.06
5													0.003	0.001	0.01	0.009	0.003															0.02
5.5											0.002		0.002	0.001	0.009																	0.01
6														0.001	0.003																	0.004
6.5															0.001	0.002																0.003
7																	0.003	0.001														0.005
7.5																			0.001	0.001												0.002
Tot		0.04	0.1	0.9	3.5	9.5	24.3	12.0	21.0	8.3	6.5	3.4	2.1	2.9	3.3		1.3			0.5			0.03	0.02				0.01	0.004		109.9	

Figure 9 : Localisation de la bouée 97404 – Pointe du Gouffre et corrélogramme entre H_{m0} et T_p en (s)

- Le corrélogramme montre que 70 % des hauteurs H_{m0} sont de l'ordre de 1 m. Les hauteurs de houle de 2 mètres ne représentent qu'un 1,4 %. Cette valeur pourra être augmentée à 7,2 mètres avec une période T_p de 13,4 secondes pour une houle de période de retour à 10 ans.
- La zone de l'ouvrage : intertidale, supratidale ou immergée. Dans le cas de ces matériaux, des modélisations ont été effectuées en zones intertidale et immergée.
- L'intensité des agents climatiques calculée est inférieure à 100.
- Les agents hydrauliques d'attrition sont des sédiments de type "sable" selon les sondages de la société FUGRO ayant effectué les études de reconnaissance géotechnique.
- La concentration de l'attaque de la houle en fonction de la hauteur de marnage et de la pente de l'ouvrage.

Pour les enrochements :

- La diminution relative de la blocométrie est prise à 11 %.
- La forme initiale de l'enrochement est équidimensionnelle (et non pas arrondie).
- La taille de l'enrochement est appréhendée par le calcul de la masse M_{50} (t).
- La gradation de l'enrochement est calculée à partir des M_{15} et M_{85} (t).
- La mobilité de l'enrochement est calculée en prenant en considération la masse M_{50} afin de calculer le D_{n50} , le delta entre la masse volumique apparente et la masse volumique de l'eau salée ainsi que la hauteur significative H_s .

Les modélisations sont généralement réalisées de la manière suivante :

- 1 - Calage des essais pris en compte COLAS ou CEREMA.
- 2 - Calcul de l'AQD de la carrière (évolution possible par la variation de paramètres).
- 3 - Calage des paramètres de l'environnement du projet.
- 4 - Variation du paramètre à évaluer. Les paramètres évalués seront par ordre le Bn (représente un pourcentage de blocs cassés lors d'essais ou d'observations sur le terrain), la CS (compression simple) et l'IC (indice de continuité). Le Bn oscillera entre $Bn = 30$ et $Bn = 10$ en passant par $Bn = 15$. La compression simple variera de $CS = 60$ MPa à $CS = 80$ MPa et $CS = 120$ MPa. Enfin l'IC sera évalué pour des valeurs de 60, 70 et 80 %.

L'ensemble des modélisations est présenté en annexe 1 (formules LMB 1/500 kg-F1 à F12).

Les simulations montrent que la tendance à la dégradation des matériaux est relativement faible car les courbes des $k_s(AQD)$ et $k_s(M_{DE})$ sont systématiquement positionnées dans le domaine "excellent" pour une mise en œuvre dans une zone totalement immergée. L'influence de chacun des paramètres est décrite ci-dessous :

- Bn : pas d'impact (85% de masse résiduelle à 100 ans).
- CS : 1% de variation (86 à 87% de masse résiduelle à 100 ans).
- IC : 2% de variation (85 à 87% de masse résiduelle à 100 ans).
- La combinaison des extrêmes Bn, CS et IC : 2% de variation (86 à 88 % de masse résiduelle à 100 ans).

3.1.2. Matériaux LMB 1/500 kg influence de la hauteur significative de la houle pour des périodes de retour 10 ans et 100 ans sur la dégradation en service due à l'usure.

Pour tester la sensibilité du modèle à la hauteur de houle retenue en donnée d'entrée, des modélisations ont été faites avec les critères suivants :

- LA = 30, MDE = 30, Bn = 30, CS = 60 MPa et IC = 60
- Hs = 7,2 m pour périodes de retour de 10 ans et Hs = 12,5 m pour une période de retour de 100 ans.

Il faut bien comprendre que les résultats des modélisations ci-dessous ne correspondent pas à des sollicitations réalistes. En effet, il est improbable qu'un ouvrage soit soumis à des hauteurs significatives de la houle de 7,2 ou 12,5 m durant des périodes respectives de 10 ans ou 100 ans.

Par comparaison avec la simulation F10 (mêmes caractéristiques intrinsèques de la roche et hauteur de houle de 2 mètres), la simulation F13 montre que pour une exposition continue à des conditions de tempête cyclonique décennale, les performances des matériaux LMB 1/500 kg seraient comprises entre les domaines "médiocre" et "satisfaisant". Pour une exposition aux conditions centennales (simulation F14), la diminution des performances est notable et atteint les domaines "inférieur à médiocre" à "limite".

3.1.3. Matériaux LMB 1/500 kg influence de la zone de l'ouvrage.

Les modélisations numérotées F15 et F16, en annexe 3, présentent les matériaux LMB 1/500 kg exposés en zone intertidale avec respectivement un $B_n = 30$, une $CS = 60$ MPa et un $IC = 60$ pour la simulation F15 et $B_n = 10$, $CS = 120$ MPa et $IC = 80$ pour la simulation F16.

Les simulations montrent qu'en zone intertidale, les performances des matériaux LMB 1/500 kg se situent dans les domaines "médiocres" avec des durées de service sensiblement comprises entre 25 et 50 ans (en moyenne) pour une perte de masse de 40 %. Il importe toutefois de noter que cette modélisation est réalisée sans prendre en compte l'effet protecteur de la carapace constituée d'acropodes et d'HMA et de la sous couche en HMA 200/1000 kg ni l'effet d'amortissement de l'onde harmonique (hauteur des vagues).

Dans ce contexte, les simulations montrent ici aussi un impact réduit de l'influence des paramètres B_n , CS et IC sur la durée de vie en service de l'ouvrage, soit 47 ans pour F15 et 55 ans pour F16 selon le modèle AQD et 26 ans dans les deux cas pour le modèle M_{DE} .

3.1.4. Synthèse des matériaux LMB 1/500 kg.

Le tableau 4 ci-dessous présente de manière synthétique l'ensemble des résultats des modélisations. Les paramètres qui varient sont de couleur rouge dans le tableau. Les résultats sont exprimés soit en pourcentage de masse résiduelle pour une durée de 100 ans ou en années de service pour une perte de masse de 40 % (coupure de l'axe horizontal des graphiques).

Matériaux LMB 1-500 kg

Influence des paramètres sur la dégradation en service due à l'usure

Fichiers	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16
Essais	Colas	Colas	Colas	Colas	Colas	Colas	Colas	Colas	Colas	Colas	Colas	Colas	Colas	Colas	Cerema	Cerema
AQD carrière	2,35	2,38	2,38	2,42	2,42	2,52	2,34	2,40	2,45	2,39	2,46	2,60	2,39	2,39	2,48	2,69
MV	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,9	2,9
Wj	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,9	0,9
LA	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
MDE	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Bn	30	15	10								15	10	30	30	30	10
CS				60	80	170	60	70	80	60	70	80	60	60	60	170
IC																80
Zone ouvrage	immergé	immergé	immergé	immergé	immergé	immergé	immergé	immergé	immergé	immergé	immergé	immergé	immergé	immergé	intermédiaire	intermédiaire
Ks AQD	0,005779	0,005669	0,005669	0,005456	0,005456	0,005054	0,005836	0,005572	0,005326	0,005589	0,005282	0,00474	0,005589	0,005589	0,005199	0,004434
XAQD	5,3911	5,3911	5,3911	5,3911	5,3911	5,3911	5,3911	5,3911	5,3911	5,3911	5,3911	5,3911	1,7864	0,7815	0,53911	0,53911
Temps équiv (ans)														64 ans	47 ans	55 ans
100 ans (M/M0)	85%	85%	85%	86%	86%	87%	85%	86%	87%	86%	87%	88%	70%	Limite	Médiocre	Médiocre
Classe	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Satisfaisant	Limite	Médiocre	Médiocre
Ks MDE	0,006433	0,006433	0,006433	0,006433	0,006433	0,006433	0,006433	0,006433	0,006433	0,006433	0,006433	0,006433	0,006433	0,006433	0,006433	0,006433
XIM50	3,6685	3,6685	3,6685	3,6685	3,6685	3,6685	3,6685	3,6685	3,6685	3,6685	3,6685	3,6685	0,20735	0,07975	0,36685	0,36685
Temps équiv (ans)													15 ans	6 ans	26 ans	26 ans
100 ans (M/M0)	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	Médiocre	inf. médiocre	Médiocre	Médiocre
Classe	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Médiocre	inf. médiocre	Médiocre	Médiocre

Tableau 4 : résultats des modélisations pour les matériaux LMB 1/500 kg

3.2. Matériaux HMA 200/1000 kg.

3.2.1. Matériaux HMA 200/1000 kg influence des paramètres Bn, Cs et IC sur la dégradation en service due à l'usure.

La même procédure que pour les matériaux LMB 1/500 kg est déclinée pour les matériaux 200/1000 kg.

Les modélisations ci-dessous reprennent les mêmes conditions d'exposition et les mêmes variations de critères Bn, CS et IC.

La numérotation des modélisations suit elle aussi la même logique que la numérotation précédemment employée pour les LMB 1/500 kg.

L'ensemble des modélisations est présenté en annexe 4 (formules HMA 200/1000 kg-F1 à F12).

Les simulations montrent que la tendance à la dégradation des matériaux est relativement faible car les courbes des $k_s(AQD)$ et $k_s(M_{DE})$ sont systématiquement positionnées dans le domaine "excellent" pour une mise en œuvre dans une zone totalement immergée. L'influence de chacun des paramètres est décrite ci-dessous :

- Bn : pas d'impact (92 % de masse résiduelle à 100 ans).
- CS : 1% de variation (92 à 93 % de masse résiduelle à 100 ans).
- IC : 1% de variation (92 à 93 % de masse résiduelle à 100 ans).
- La combinaison des extrêmes Bn, CS et IC : 1% de variation (93 à 94 % de masse résiduelle à 100 ans).

3.2.2. Matériaux HMA 200/1000 kg influence de la zone de l'ouvrage.

Les modélisations numérotées F13 et F14, en annexe 5, présentent les matériaux HMA 200/1000 kg exposés en zone intertidale avec respectivement un Bn = 30, une CS = 60 MPa et un IC = 60 pour la simulation F13 et Bn = 10, CS = 120 MPa et IC = 80 pour la simulation F14.

Les simulations montrent qu'en zone intertidale, les performances des matériaux HMA 200/1000 kg se situent dans les domaines « limites » avec des masses résiduelles à 100 ans d'environ 60 à 65 %. Il importe toutefois de noter que cette modélisation est réalisée sans prendre en compte l'effet protecteur de la carapace constituée d'acropodes et d'HMA ni l'effet d'amortissement de l'onde harmonique (hauteur des vagues).

Dans ce contexte, les simulations montrent ici aussi un impact réduit de l'influence des paramètres Bn, CS et IC sur la masse résiduelle à 100 ans soit 63 % pour F13 et 67 % pour F14 selon le modèle AQD et 61 % dans les deux cas pour le modèle M_{DE} .

3.2.3. Synthèse des matériaux HMA 200/1000 kg.

Le tableau 5 ci-dessous présente de manière synthétique l'ensemble des résultats des modélisations. Les paramètres qui varient sont de couleur rouge dans le tableau. Les résultats sont exprimés soit en pourcentage de masse résiduelle pour une durée de 100 ans ou en années de service pour une perte de masse de 40 % (coupure de l'axe horizontal des graphiques).

Matériaux HMA 0.2 - 1 tonne

Influence des paramètres sur la dégradation en service due à l'usure

Fichiers	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14
Essais	Colas	Colas	Colas	Colas	Colas	Colas	Colas	Colas	Colas	Colas	Colas	Colas	Cerema	Cerema
AQD carrière	2,46	2,45	2,48	2,48	2,52	2,52	2,62	2,44	2,49	2,55	2,55	2,7	2,57	2,79
MV	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,90	2,90
Wa	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,9	0,9
LA														
MDE	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Bn		30	15	10							15	10	30	10
CS					60	80	120	60	70	80	80	80	60	170
IC											70	80	60	80
Zone ouvrage	immergée	immergée	immergée	immergée	immergée	immergée	immergée	immergée	immergée	immergée	immergée	immergée	intertidale	intertidale
Ks AQD	0,005274	0,005323	0,005219	0,005219	0,00505	0,00505	0,004668	0,005392	0,005141	0,004908	0,004912	0,004396	0,004832	0,004106
XAQD	11,8976	11,8976	11,8976	11,8976	11,8976	11,8976	11,8976	11,8976	11,8976	11,8976	11,8976	11,8976	1,18976	1,18976
Temps équiv (ans)	92%	92%	92%	92%	92%	92%	93%	92%	92%	93%	93%	94%	63%	67%
100 ans (M/M0)	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Limite +	Limite/Satisfaisa
Classe														
Ks MDE	0,003523	0,003523	0,003523	0,003523	0,003523	0,003523	0,003523	0,003523	0,003523	0,003523	0,003523	0,003523	0,003523	0,003523
XIM50	8,096	8,096	8,096	8,096	8,096	8,096	8,096	8,096	8,096	8,096	8,096	8,096	0,8096	0,8096
Temps équiv (ans)	92%	92%	92%	92%	92%	92%	92%	92%	92%	92%	92%	92%	61%	61%
100 ans (M/M0)	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Limite	Limite
Classe														

Tableau 5 : résultats des modélisations pour les matériaux HMA 200/1000 kg

3.3. Matériaux CP 0/300 mm.

3.3.1. Matériaux CP 0/300 mm influence des paramètres Bn, Cs et IC sur la dégradation en service due à l'usure.

La même procédure est ici déclinée pour les matériaux CP 0/300mm. Ceci est une première approche, en prenant comme hypothèse pour les modélisations ci-dessous, que les matériaux CP 0/300mm ne seraient protégés ni par les LMB 1/500 kg ni par la carapace et donc directement soumis à la houle.

Les modélisations ci-dessous reprennent les mêmes conditions d'exposition et les mêmes variations des critères Bn, CS et IC.

La numérotation des modélisations suit elle aussi la même logique que la numérotation précédemment employée pour les LMB 1/500 kg avec prise en compte des deux caractéristiques des matériaux de remblais en eau et hors d'eau ce qui se traduit respectivement par le cas A (LA = 35 et $M_{DE} = 30$) et le cas B (LA = 45 et $M_{DE} = 45$).

3.3.2. Cas A - LA = 35 et $M_{DE} = 30$.

Les simulations montrent que la tendance à la dégradation des matériaux est ici plus accentuée que pour les deux blocométries précédentes. En effet les courbes des $k_s(AQD)$ et $k_s(M_{DE})$ sont systématiquement positionnées à la fois dans le domaine "satisfaisant" et dans la partie haute de la zone "limite" pour une mise en œuvre dans une zone totalement immergée. L'influence de chacun des paramètres est décrite ci-dessous :

- Bn : 1 % de variation (75 à 76 % de masse résiduelle à 100 ans).
- CS : 2 % de variation (76 à 78 % de masse résiduelle à 100 ans).
- IC : 2 % de variation (75 à 77 % de masse résiduelle à 100 ans).
- La combinaison des extrêmes Bn, CS et IC : 2 % de variation (76 à 78 % de masse résiduelle à 100 ans).

3.3.3. Cas B - LA = 45 et $M_{DE} = 45$.

Les mêmes modélisations vont être appliquées dans les conditions de cas B.

Les simulations montrent que la tendance à la dégradation des matériaux est ici plus accentuée que pour le cas A ($LA=35$ et $M_{DE}=30$). En effet les courbes des $k_s(AQD)$ et $k_s(M_{DE})$ sont systématiquement positionnées à la fois dans le domaine "satisfaisant" ou dans la partie basse de la zone "limite" pour une mise en œuvre dans une zone totalement immergée. L'influence de chacun des paramètres est décrite ci-dessous :

- Bn : 1 % de variation (71 à 72 % de masse résiduelle à 100 ans).
- CS : 2 % de variation (72 à 74 % de masse résiduelle à 100 ans).
- IC : 3 % de variation (70 à 73 % de masse résiduelle à 100 ans.),
- La combinaison des extrêmes Bn, CS et IC : 3% de variation (72 à 75 % de masse résiduelle à 100 ans).

3.3.4. Synthèse des matériaux CP 0/300 mm.

Le tableau 6 ci-dessous présente de manière synthétique l'ensemble des résultats des modélisations. Les paramètres qui varient sont de couleur rouge dans le tableau. Les résultats sont exprimés soit en pourcentage de perte de masse pour une durée de 100 ans ou en années de service pour une perte de masse de 40 % (coupure de l'axe horizontale des graphiques).

Matériaux CP 0-300 mm

Influence des paramètres sur la dégradation en service due à l'usure

Fichiers Essais	F1 Cerema	F2 Cerema	F3 Cerema	F4 Cerema	F5 Cerema	F6 Cerema	F7 Cerema	F8 Cerema	F9 Cerema	F10 Cerema	F11 Cerema
AQD carrière	2,48	2,48	2,46	2,52	2,52	2,61	2,44	2,50	2,55	2,48	2,69
MV	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90
Wa	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
LA	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
MDE	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Bn	10	15	30	60	80	120	60	70	80	60	120
CS											
IC											
Zone ouvrage	immergée	immergée	immergée	immergée	immergée	immergée	immergée	immergée	immergée	immergée	immergée
Ks AQD	0,005212	0,005212	0,005308	0,005054	0,005054	0,004695	0,005374	0,005140	0,004922	0,005199	0,004434
XAQD	2,3023	2,3023	2,3023	2,3023	2,3023	2,3023	2,3023	2,3023	2,3023	2,3023	2,3023
Temps équiv (ans)	76%	76%	75%	76%	76%	78%	75%	76%	77%	76%	78%
100 ans (M/M0)	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant
Classe	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant
Ks MDE	0,006433	0,006433	0,006433	0,006433	0,006433	0,006433	0,006433	0,006433	0,006433	0,006433	0,006433
XIM50	1,6445	1,6445	1,6445	1,6445	1,6445	1,6445	1,6445	1,6445	1,6445	1,6445	1,6445
Temps équiv (ans)	64%	64%	64%	64%	64%	64%	64%	64%	64%	64%	64%
100 ans (M/M0)	Limite +	Limite +	Limite +	Limite +	Limite +	Limite +	Limite +	Limite +	Limite +	Limite +	Limite +
Classe	Limite +	Limite +	Limite +	Limite +	Limite +	Limite +	Limite +	Limite +	Limite +	Limite +	Limite +
Fichiers Essais	F12 Cerema	F13 Cerema	F14 Cerema	F15 Cerema	F16 Cerema	F17 Cerema	F18 Cerema	F19 Cerema	F20 Cerema	F21 Cerema	F22 Cerema
AQD carrière	2,19	2,19	2,17	2,25	2,25	2,34	2,16	2,22	2,27	2,23	2,44
MV	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90
Wa	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
LA	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
MDE	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Bn	10	15	30	60	80	120	60	70	80	60	120
CS											
IC											
Zone ouvrage	immergée	immergée	immergée	immergée	immergée	immergée	immergée	immergée	immergée	immergée	immergée
Ks AQD	0,00668	0,00668	0,00682	0,00633	0,00633	0,005829	0,006855	0,00652	0,006208	0,006427	0,005389
XAQD	2,3023	2,3023	2,3023	2,3023	2,3023	2,3023	2,3023	2,3023	2,3023	2,3023	2,3023
Temps équiv (ans)	72%	72%	71%	72%	72%	74%	70%	71%	73%	72%	75%
100 ans (M/M0)	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant
Classe	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant	Satisfaisant
Ks MDE	0,01175	0,01175	0,01175	0,01175	0,01175	0,01175	0,01175	0,01175	0,01175	0,01175	0,01175
XIM50	1,6445	1,6445	1,6445	1,6445	1,6445	1,6445	1,6445	1,6445	1,6445	1,6445	1,6445
Temps équiv (ans)	64 ans	64 ans	64 ans	64 ans	64 ans	64 ans	64 ans	64 ans	64 ans	64 ans	64 ans
100 ans (M/M0)	Limite -	Limite -	Limite -	Limite -	Limite -	Limite -	Limite -	Limite -	Limite -	Limite -	Limite -
Classe	Limite -	Limite -	Limite -	Limite -	Limite -	Limite -	Limite -	Limite -	Limite -	Limite -	Limite -

Tableau 6 : résultats des modélisations pour les matériaux CP 0/300mm

4. CONCLUSIONS

Cette étude a permis la mise en œuvre des modèles de prédiction de la dégradation en service due à l'usure des matériaux développés par le CEREMA Ouest (Laboratoire d'Angers) en application du chapitre 3.6 du Rock Manual de 2009.

Dans cette phase, le comportement de chacun des matériaux LMB 1/500 kg, HMA 200/1000 kg et CP 0/300 mm a été modélisé de manière individuelle sans prendre en compte la notion d'exposition en fonction de leur positionnement au sein de l'ouvrage et par conséquent de l'amortissement de l'onde harmonique (hauteur de la houle) dans les différentes couches de protection et notamment la carapace.

La prédiction de la dégradation en service due à l'usure est appréhendée par deux modèles l'un basé sur le paramètre M_{DE} des matériaux et l'autre sur l'indice de qualité de l'enrochement AQD (intégrant dans ses critères la géologie et la qualité du gisement, la méthode de production en carrière des enrochements ainsi qu'un ensemble de caractéristiques intrinsèques du matériau...).

Ces modèles qui simulent une exposition directe aux sollicitations (exposition du site, agents d'attrition, agents climatiques...) permettent, de manière relative, d'effectuer des études paramétriques, et en l'occurrence d'évaluer l'impact de variations de différents paramètres tels que B_n , CS, IC et M_{DE} .

Les résultats de ces travaux démontrent les points suivants :

- Concernant les matériaux LMB 1/500 kg dans un contexte immergé ou intertidal, l'impact sur la perte de masse à 100 ans, des variations des paramètres B_n , CS et IC est négligeable, de l'ordre de quelques pourcents uniquement.
- Concernant les matériaux HMA 200/1000 kg, les conclusions sont identiques.
- Concernant les matériaux CP 0/300 mm en immergé, les conclusions sont identiques pour les paramètres B_n , CS et IC. Par contre l'impact d'une variation du M_{DE} de 30 à 45, est notable sur le modèle basé sur l'indice AQD et bien évidemment plus encore sur le modèle M_{DE} .

Afin de dépasser cette approche comparative, cette étude se poursuivra par la mise au point d'un modèle d'atténuation de l'onde harmonique dans les différentes couches de l'ouvrage, permettant in fine, de pouvoir mieux estimer les sollicitations auxquelles sont soumis les matériaux CP 0/300 mm et LMB 1/500 kg. Les résultats de ces modélisations devraient pouvoir confirmer la faible exposition, au sens du Rock Manual, de ces matériaux du cœur de digue.

Rédigé par,

Valéry LE TURDU
Géologue



Vérfié par,

Sébastien BARLIER
Technicien enrochement

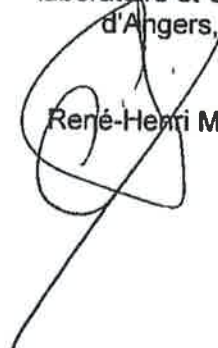


Nicolas ROUXEL
Responsable PCI Maritime



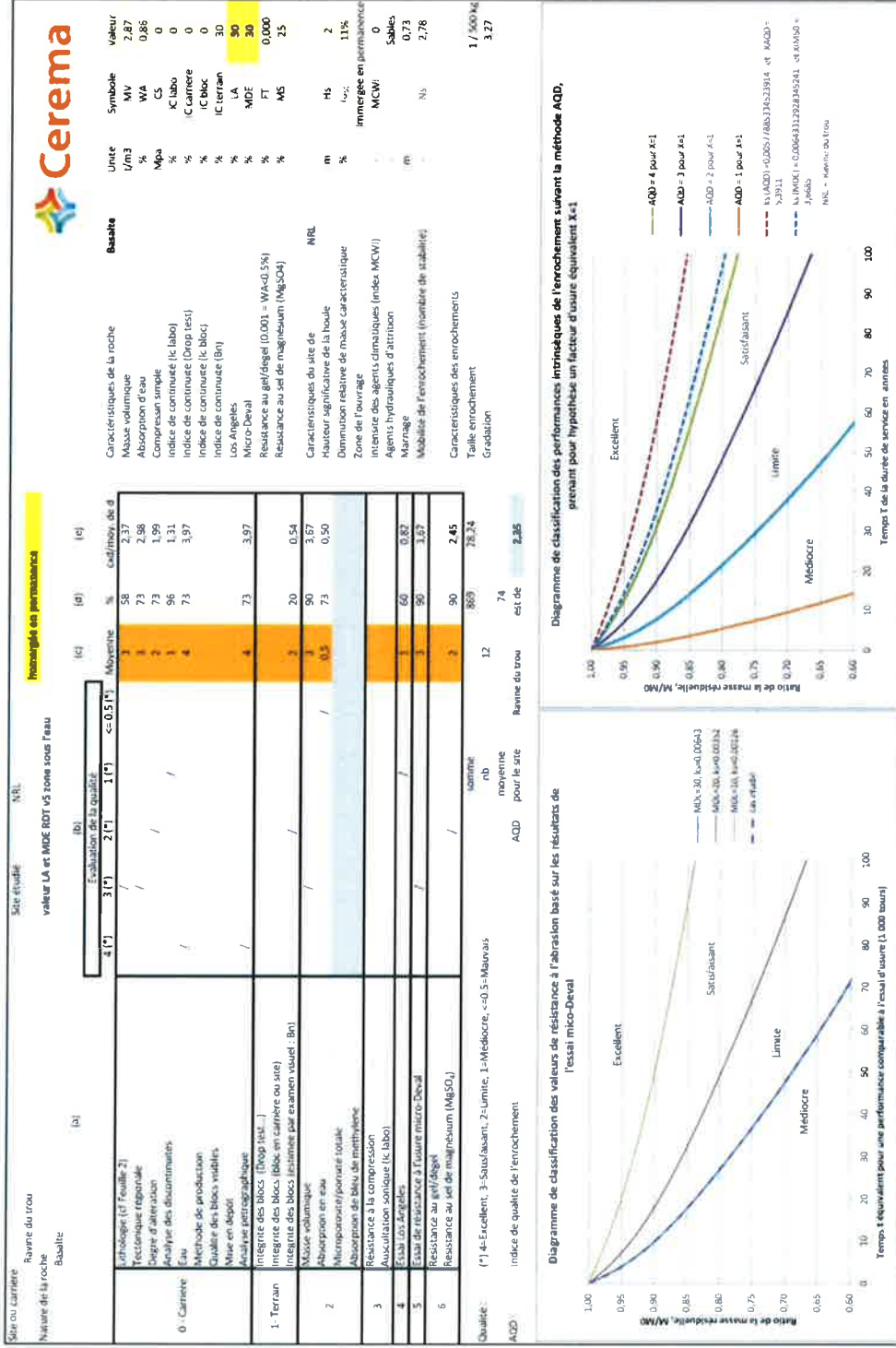
Le Directeur du département
laboratoire et GECP
d'Angers,

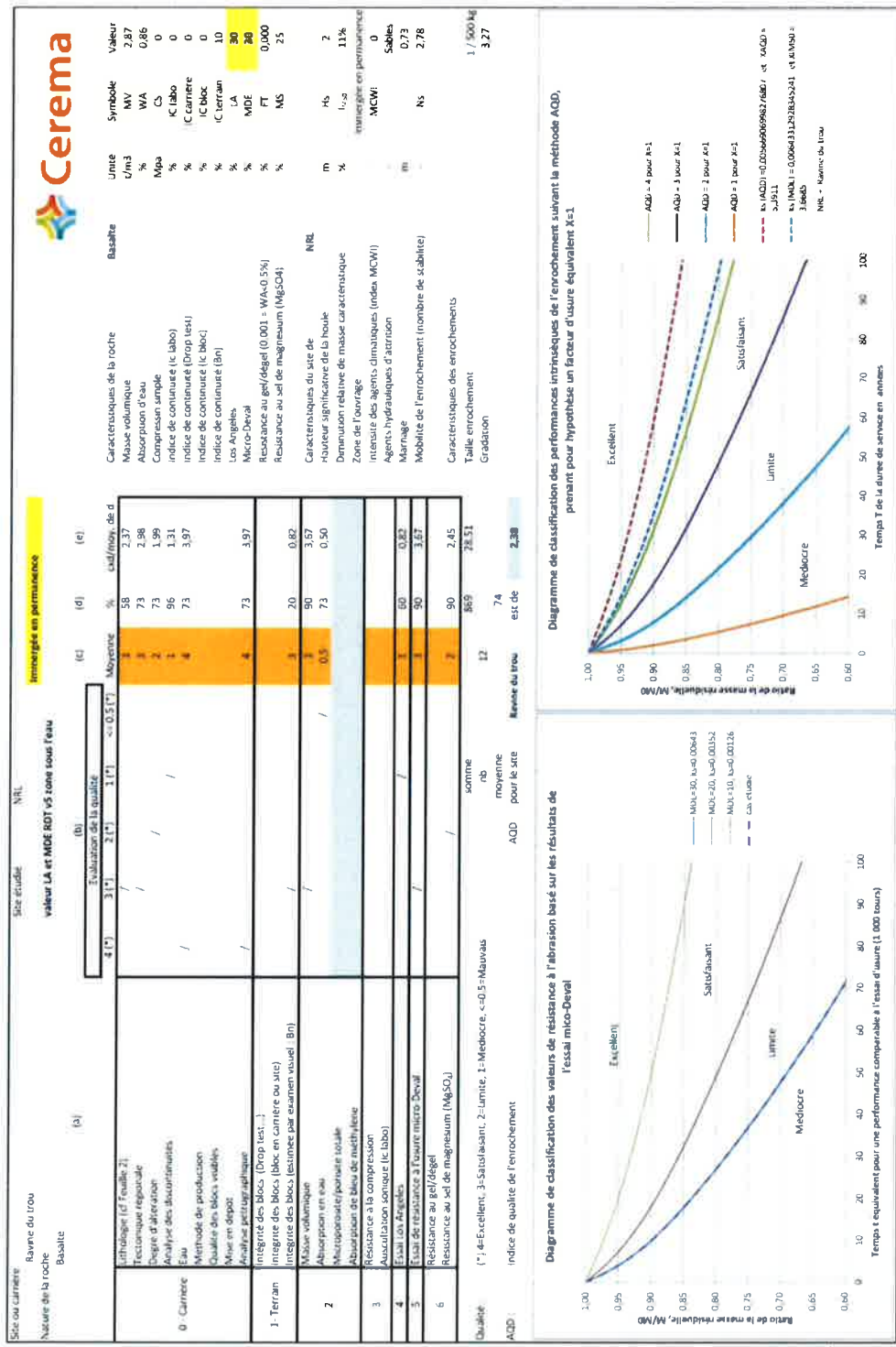
René-Henri MILIN



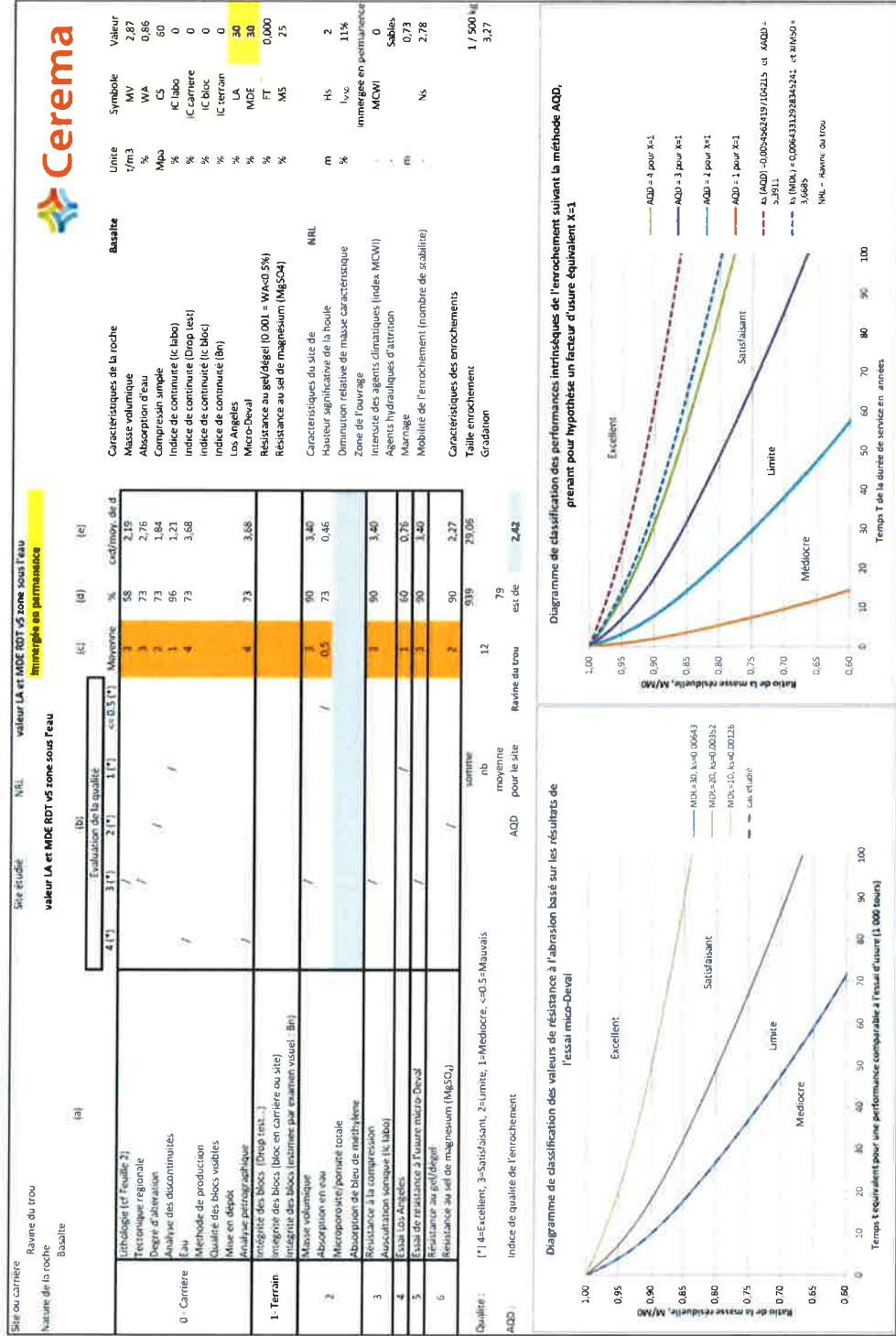
ANNEXE 1

Matériaux LMB 1/500 kg, influence des paramètres Bn, Cs et IC sur la dégradation en service due à l'usure.

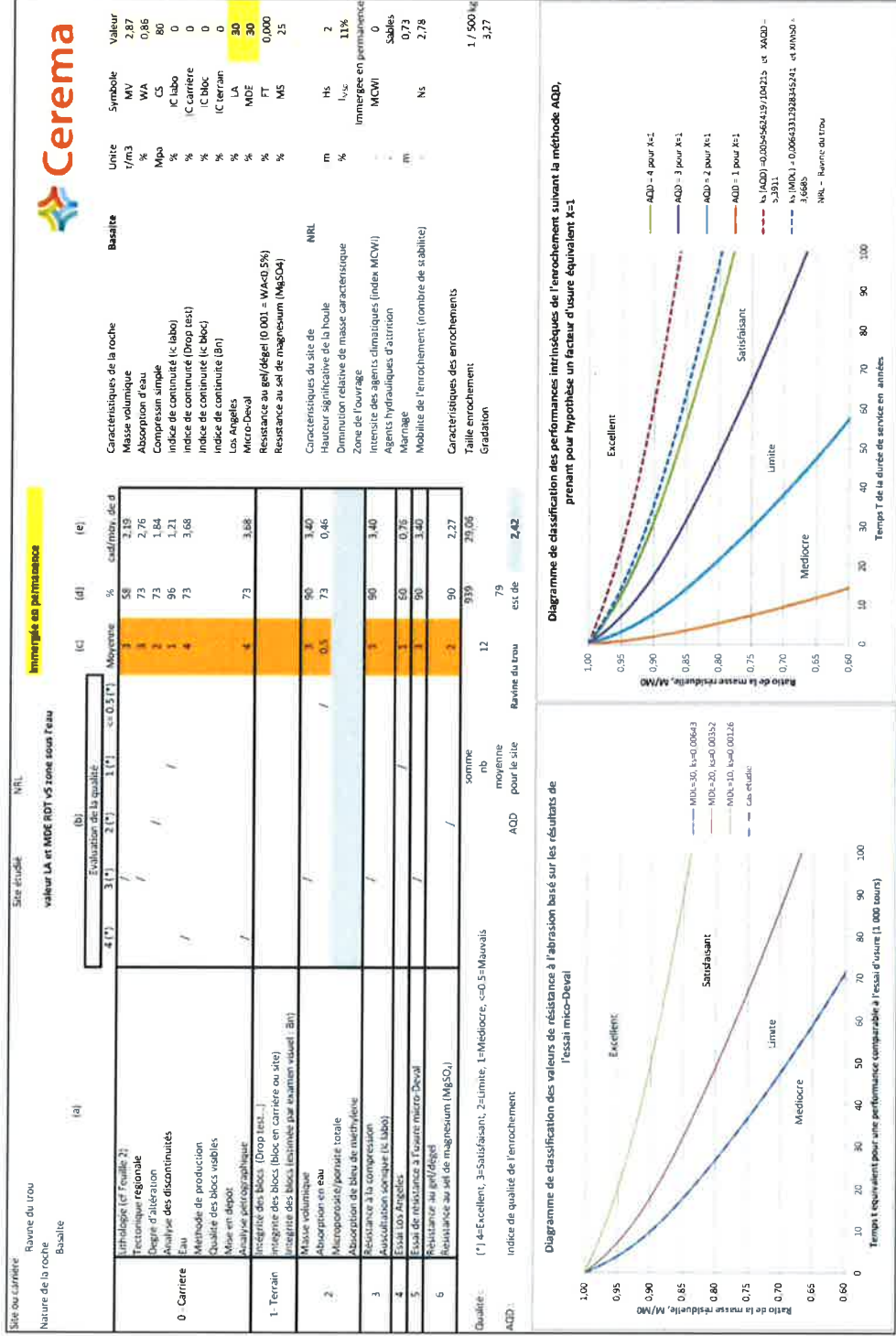




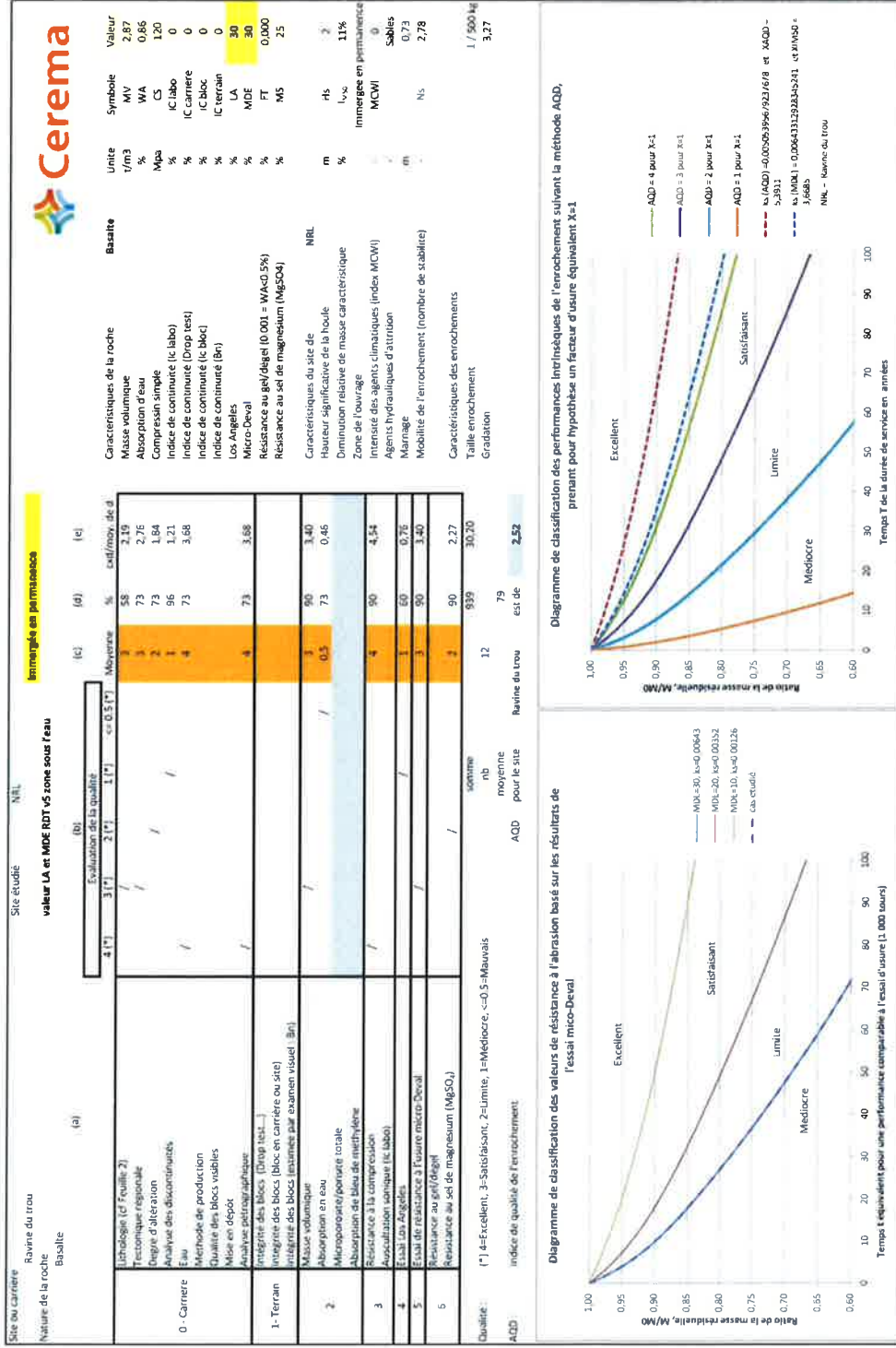
Annexe 1.3 LMB 1/500 kg – F3 : modélisation pour le LMB1/500 kg avec LA=30, MDE=30 et Bn=10



Annexe 1.4 LMB 1/500 kg – F4 : modélisation pour le LMB1/500 kg avec LA=30, MDE=30 et CS=60 MPa



Annexe 1.5 LMB 1/500 kg – F5 : modélisation pour le LMB1/500 kg avec LA=30, MDE=30 et CS=80 MPa



Annexe 1.6 LMB 1/500 kg – F6 : modélisation pour le LMB1/500 kg avec LA=30, MDE=30 et CS=120 MPa

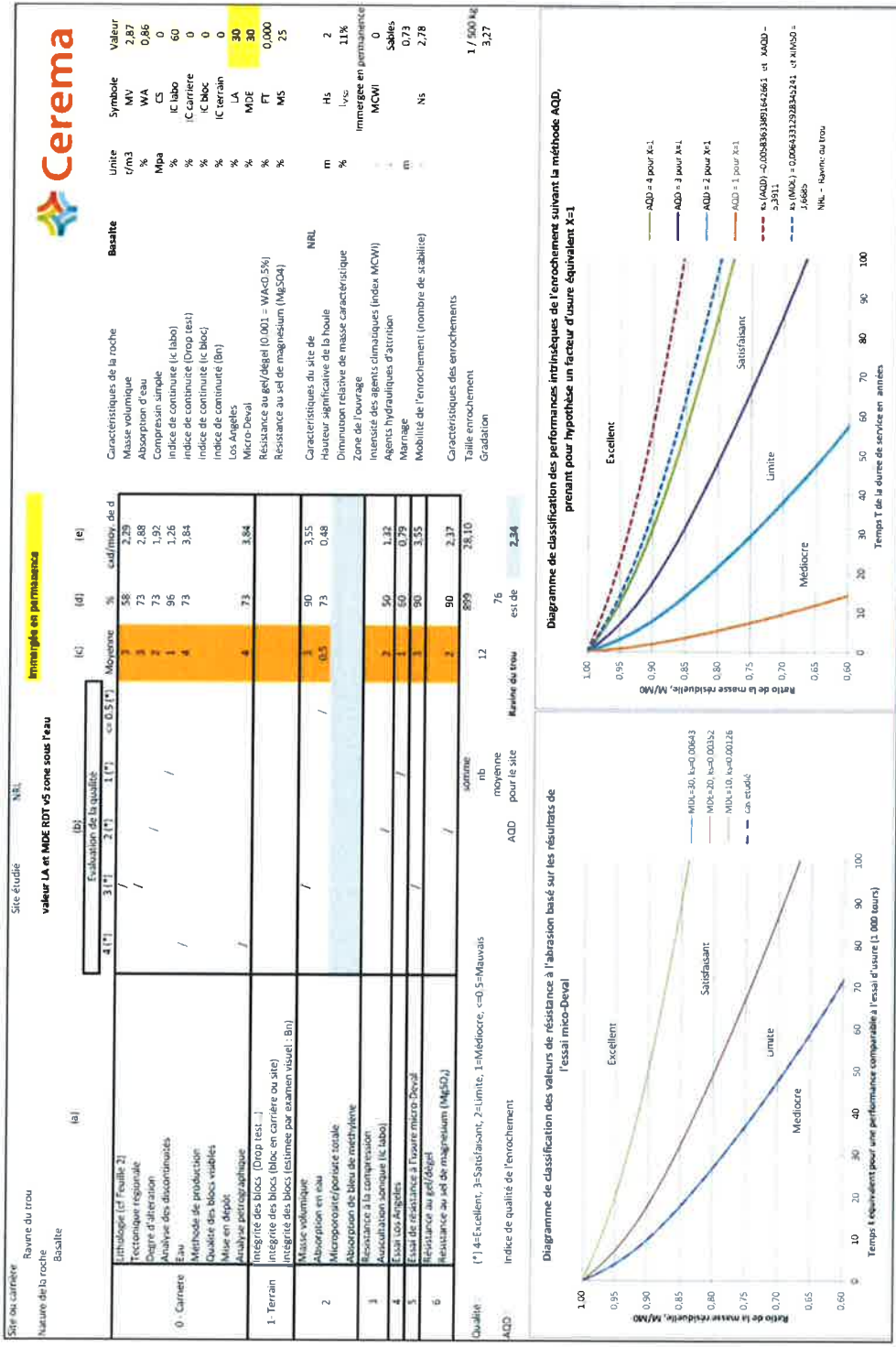
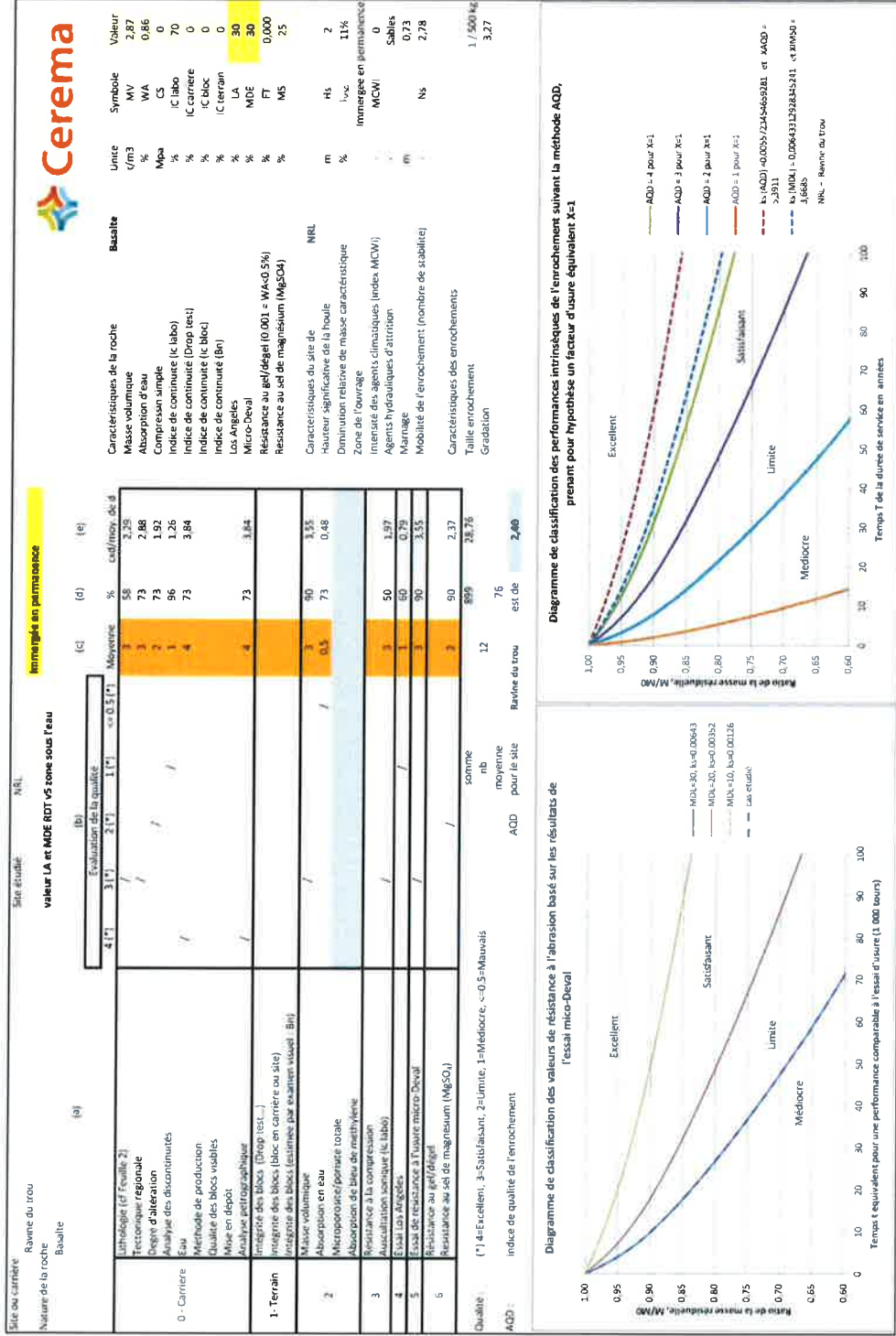


Diagramme de classification des valeurs de résistance à l'abrasion basé sur les résultats de l'essai micro-Deval

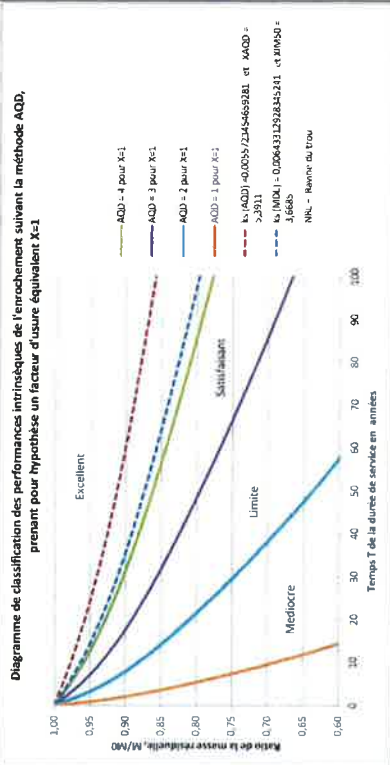
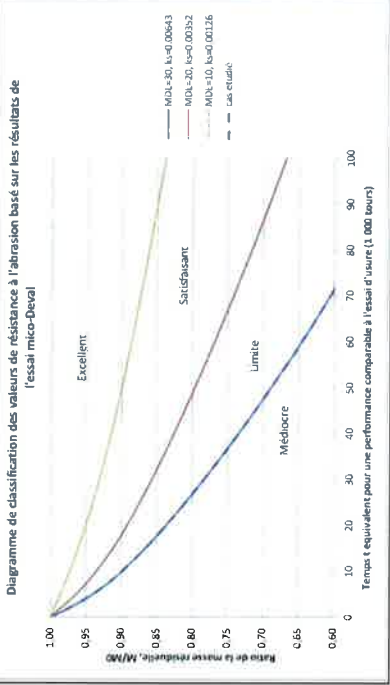
Diagramme de classification des performances intrinsèques de l'enrochement suivant la méthode AQD, prenant pour hypothèse un accret d'usure équivalent X=1

Annexe 1.7 LMB 1/500 kg – F7 : modélisation pour le LMB1/500 kg avec LA=30, MDE=30 et IC=60



(a)	(b)				(c)	(d)	(e)
	4 (*)	3 (*)	2 (*)	1 (*)			
0 - Carrière	Evolution de la qualité				Moyenne	58	cad/moy. de d
	Lithologie (cf Feuille 2)	/	/	/	3	2,35	
	Tectonique régionale	/	/	/	3	2,88	
	Degré d'altération	/	/	/	2	73	1,92
	Analyse des discontinuités	/	/	/	1	96	1,26
	Eau	/	/	/	4	73	3,84
1 - Terrain	Mise en dépôt				4	73	3,84
	Analyse pétrographique				4	73	3,84
	Impérial des blocs (Thopi test...)				4	73	3,84
	Impérial des blocs (bloc en carrière ou site)				4	73	3,84
	Impérial des blocs (estime par analyses visuel - Bn)				4	73	3,84
	Masse volumique				3	90	3,35
2	Absorption en eau				0,5	73	0,48
	Métroporoposité totale				3	90	3,35
	Absorption de bleu de méthylène				3	90	3,35
	Résistance à la compression				3	50	1,97
	Auscultation sonique (u labo)				1	60	0,79
	Essai Los Angeles				3	90	3,35
3	Essai de résistance à l'usure micro-Deval				3	90	3,35
	Essai de résistance au gel/dégel				3	90	3,35
	Résistance au sel de magnésium (MgSO ₄)				3	90	3,35
	Qualité				3	90	3,35
	ACQ				12	76	2,49
	Somme				28,76		

Caractéristiques de la roche	Basalte	Unité	Symbole	Valeur
Masse volumique		t/m ³	MV	2,87
Absorption d'eau		%	WA	0,86
Compression simple		Mpa	CS	0
Indice de continuité (IC labo)		%	IC labo	70
Indice de continuité (Drap test)		%	IC carrière	0
Indice de continuité (ic bloc)		%	IC bloc	0
Indice de continuité (ic bloc)		%	IC terrain	0
Los Angeles		%	LA	30
Micro-Deval		%	MDE	30
Résistance au gel/dégel (0,001 - Wk-O 5%)		%	FT	0,000
Résistance au sel de magnésium (MgSO ₄)		%	MS	2,5
Caractéristiques du site de	NRL	m	HS	2
Hauteur significative de la houille		%	h _{oc}	11%
Diminution relative de masse caractéristique		%		
Zone de l'ouvrage			MCWI	0
Intensité des agents climatiques (index MCWI)				
Agents hydrologiques d'attrition				
Marriage		(m)	Ns	0,73
Mobilité de l'enrochement (nombre de stablitz)				2,78
Caractéristiques des enrochements				1 / 500 kg
Taille enrochement				3,27
Gradation				



Annexe 1.8 LMB 1/500 kg – F8 : modélisation pour le LMB1/500 kg avec LA=30, MDE=30 et IC=70

Site au carrière		Site étudié		NRL		
Ravine du trou		valeur LA et MOE RDT vs zone sous l'eau		Immergée en permanence		
Nature de la roche		Basalte		Basalte		
0 Carrière	1- Terrain	4 (*)	3 (*)	2 (*)	1 (*)	1 (*)
	2	3	2	1	1	1
	3	3	2	1	1	1
	4	3	2	1	1	1
	5	3	2	1	1	1
	6	3	2	1	1	1
Qualité	ADQ : 12					ADQ : 12
ADQ :	indice de qualité de l'enrochement					indice de qualité de l'enrochement

Caractéristiques de la roche	Unité	Symbol	Valeur
Masse volumique	t/m ³	MV	2,87
Absorption d'eau	%	WA	0,86
Compression simple	Mpa	CS	0
Indice de continuité (ic labo)	%	IC labo	80
Indice de continuité (ic bloc)	%	IC carrière	0
Indice de continuité (ic bloc)	%	IC terrain	0
Los Angeles	%	LA	30
Micro-Deval	%	MDE	30
Resistance au gel/dégel (0.001 - WA<0.5%)	%	FT	0,000
Resistance au sel de magnésium (MgSO4)	%	MS	25

Caractéristiques du site de	Unité	Symbol	Valeur
Hauteur significative de la houle	m	Hs	2
Diminution relative de masse caractéristique	%	l _{vo}	11%
Zone de l'ouvrage		l _{vo}	11%
Intensité des agents climatiques (index MCWI)		MCWI	0
Agents hydrologiques d'attrition			Sables
Marriage			0,73
Mobilité de l'enrochement (nombre de stabiliza)		Ns	2,78

Caractéristiques des enrochements	Unité	Valeur
Taille enrochement		1 / 500 kg
Gradation		3,27

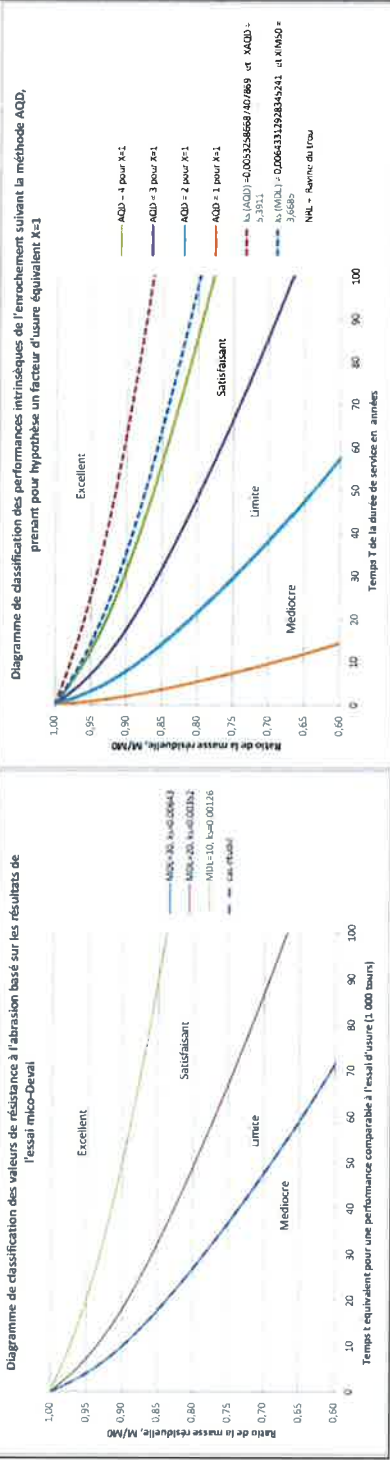
Evolution de la qualité	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
4 (*)	3 (*)	2 (*)	1 (*)	1 (*)	1 (*)
3	3	2	1	1	1
2	3	2	1	1	1
1	3	2	1	1	1
0	3	2	1	1	1

Caractéristiques de la roche	Unité	Symbol	Valeur
Masse volumique	t/m ³	MV	2,87
Absorption d'eau	%	WA	0,86
Compression simple	Mpa	CS	0
Indice de continuité (ic labo)	%	IC labo	80
Indice de continuité (ic bloc)	%	IC carrière	0
Indice de continuité (ic bloc)	%	IC terrain	0
Los Angeles	%	LA	30
Micro-Deval	%	MDE	30
Resistance au gel/dégel (0.001 - WA<0.5%)	%	FT	0,000
Resistance au sel de magnésium (MgSO4)	%	MS	25

Caractéristiques du site de	Unité	Symbol	Valeur
Hauteur significative de la houle	m	Hs	2
Diminution relative de masse caractéristique	%	l _{vo}	11%
Zone de l'ouvrage		l _{vo}	11%
Intensité des agents climatiques (index MCWI)		MCWI	0
Agents hydrologiques d'attrition			Sables
Marriage			0,73
Mobilité de l'enrochement (nombre de stabiliza)		Ns	2,78

Caractéristiques des enrochements	Unité	Valeur
Taille enrochement		1 / 500 kg
Gradation		3,27

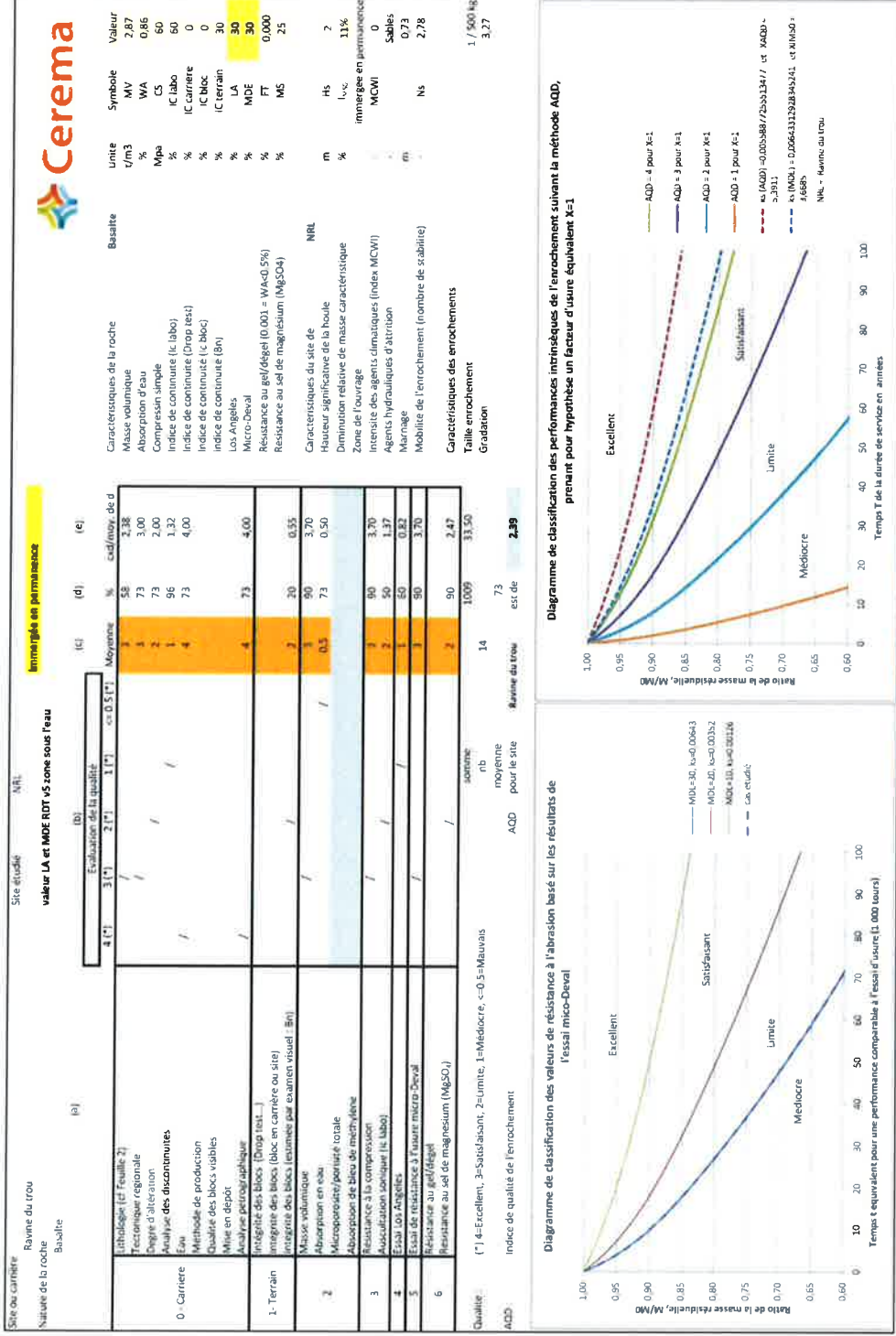
Annexe 1.9 LMB 1/500 kg – F9 : modélisation pour le LMB1/500 kg avec LA=30, MDE=30 et IC=80



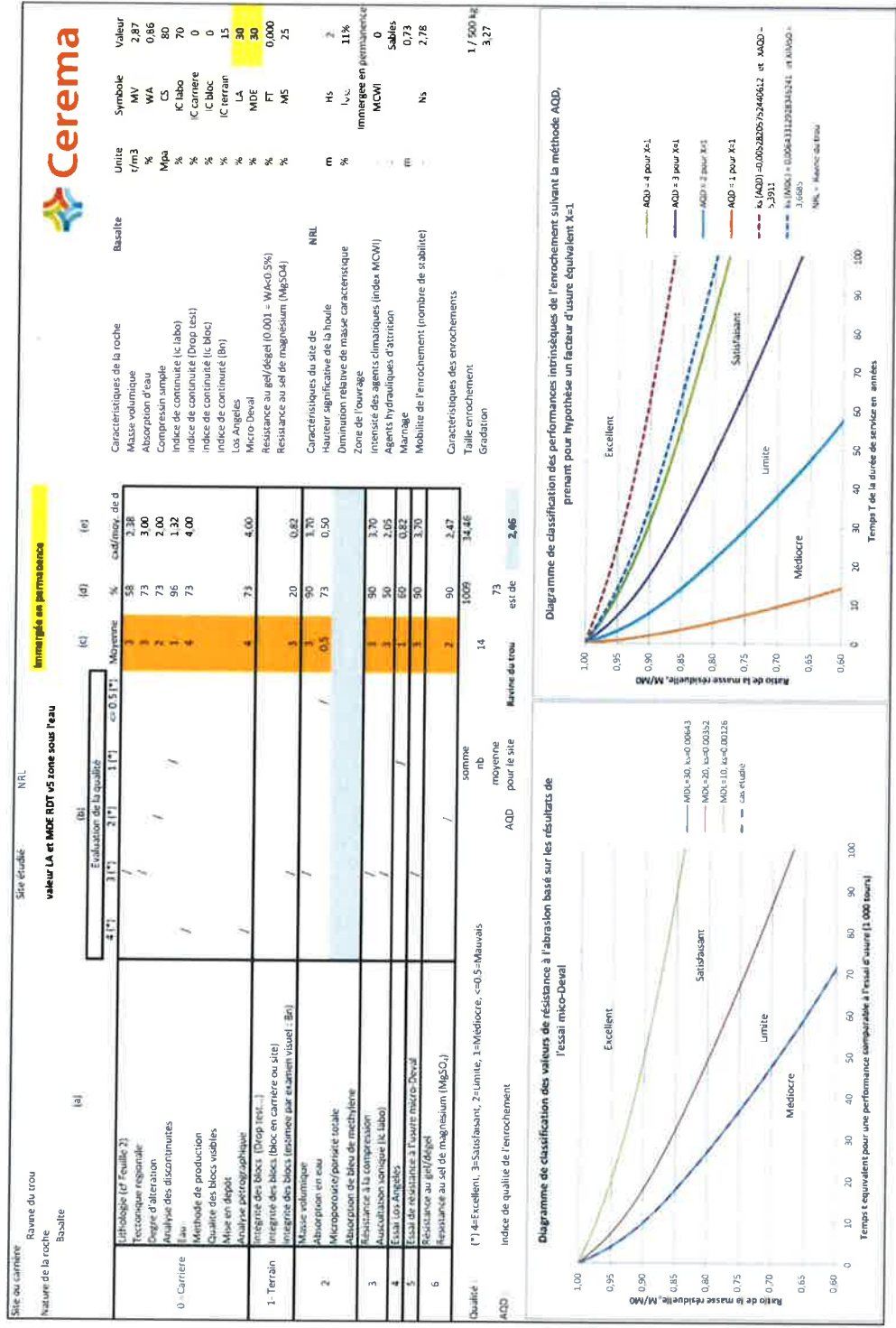
EXPERTISE DES MATERIAUX DE LA FUTURE CARRIERE DE LA RAVINE DU TROU A LA REUNION

Rapport phase A

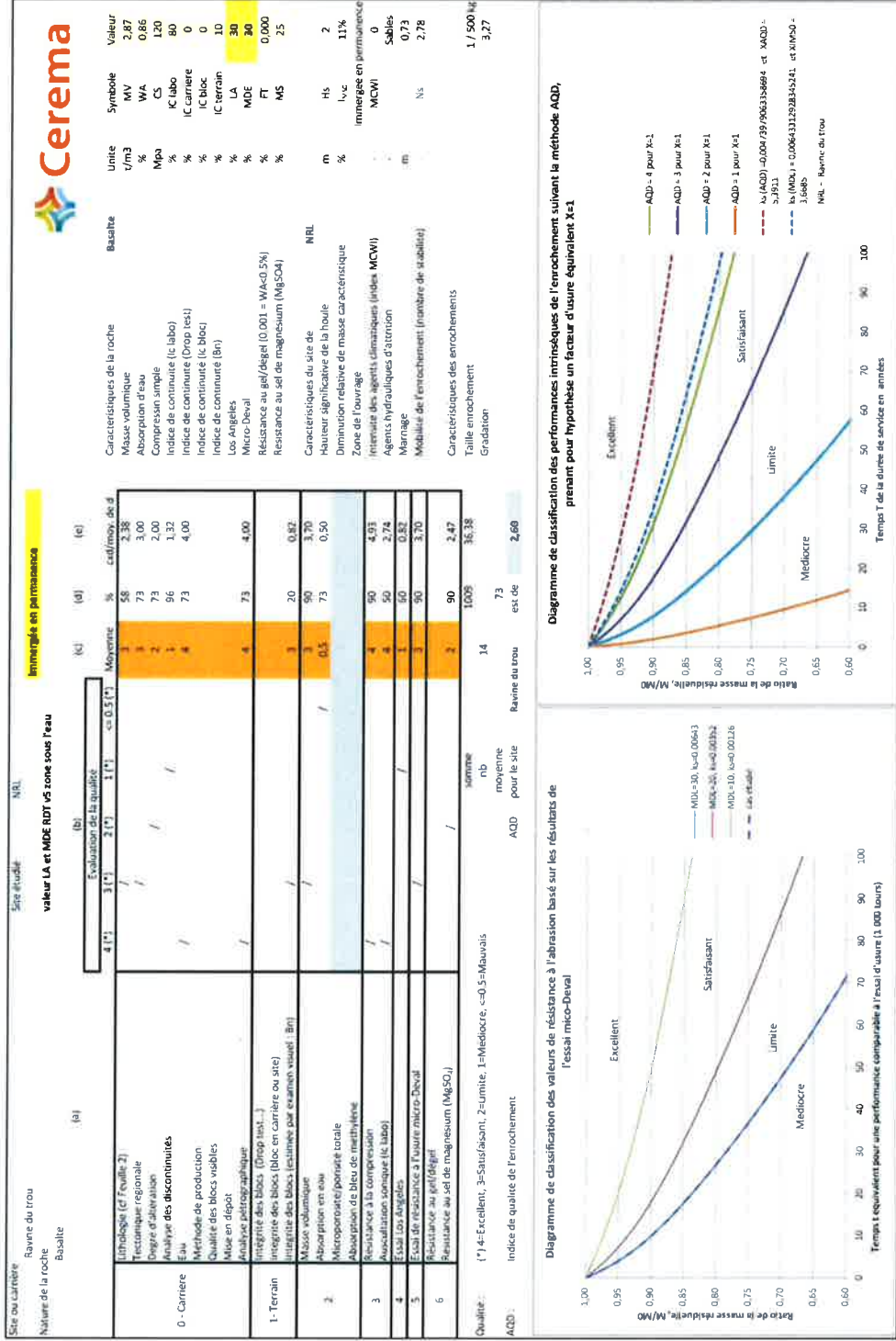




Annexe 1.10 LMB 1/500 kg – F10 : modélisation pour le LMB1/500 kg avec LA=30, MDE=30 et Bn=30, CS=60 MPa et IC=60



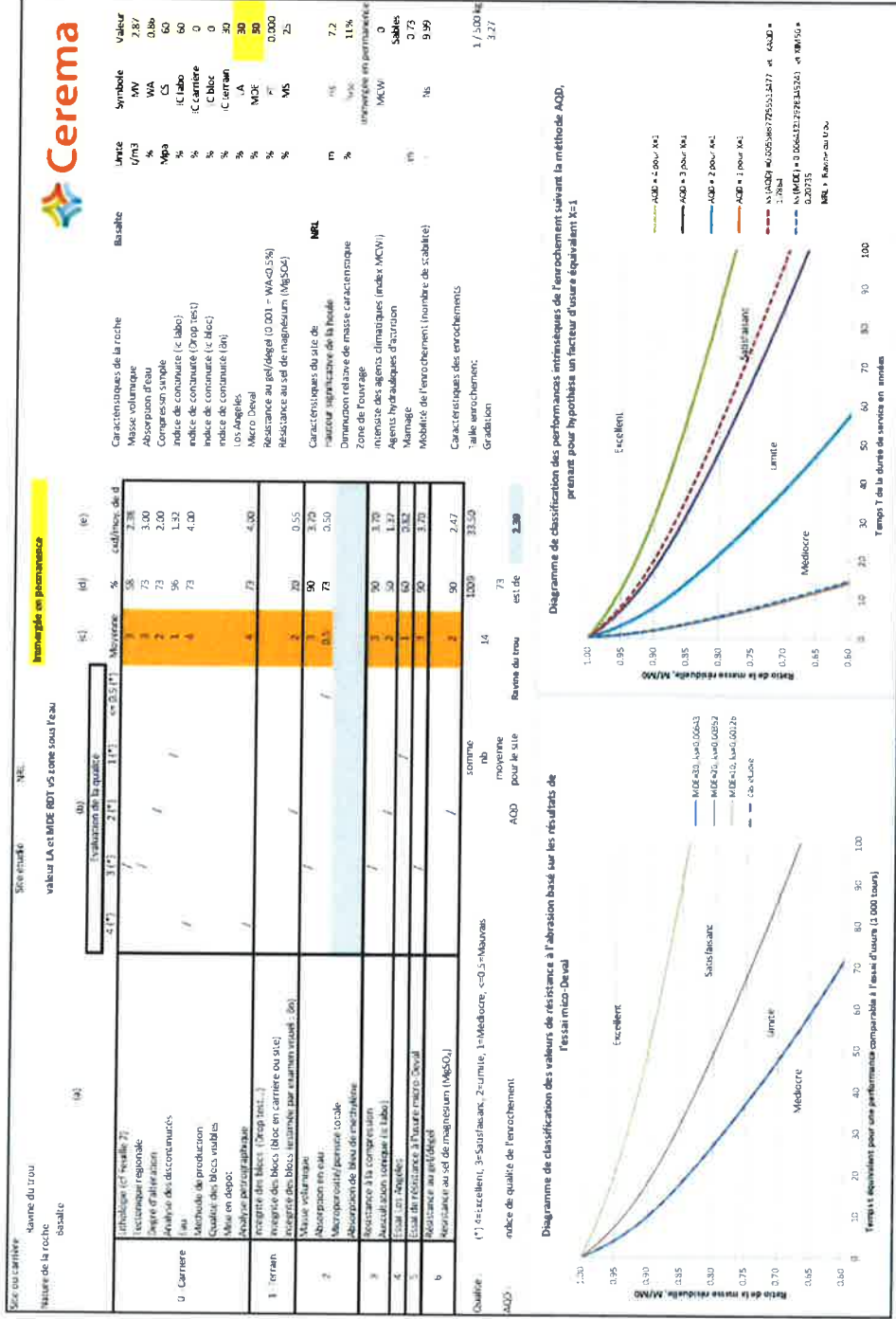
Annexe 1.11 LMB 1/500 kg – F11 : modélisation pour le LMB1/500 kg avec LA=30, MDE=30 et Bn=15, CS=80 MPa et IC=70



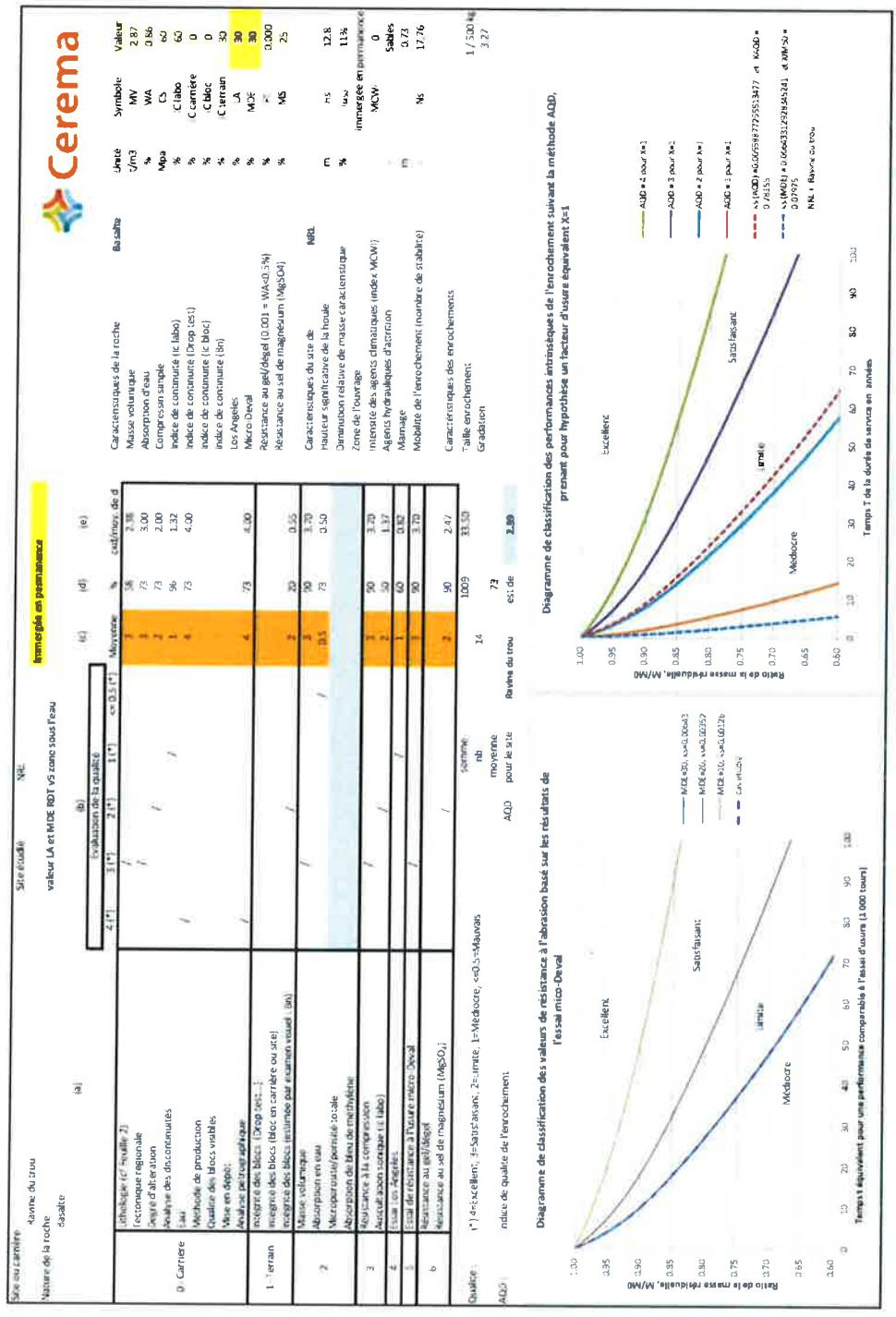
Annexe 1.12 LMB 1/500 kg – F12 : modélisation pour le LMB1/500 kg avec LA=30, MDE=30 et Bn=10, CS=120 MPa et IC=80

ANNEXE 2

Matériaux LMB 1/500 kg, influence de la hauteur significative de la houle pour des périodes de retour 10 ans et 100 ans sur la dégradation en service due à l'usure.



Annexe 2.1 LMB 1/500 kg-F13: modélisation pour le LMB1/500 kg avec LA=30, MDE=30 et Bn=30, CS=60 MPA, IC=60 et Hs = 7,2 mètres (10 ans)



Annexe 2.2 LMB 1/500 kg – F14 : modélisation pour le LMB1/500 kg avec LA=30, MDE=30 et Bn=30, CS=60 MPa, IC=60 et Hs = 12,5 mètres (100 ans)

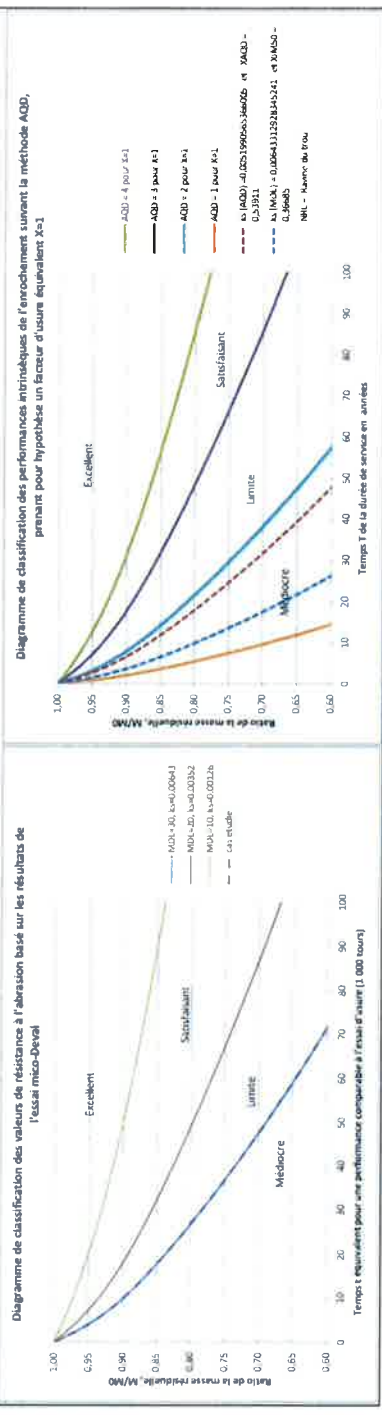
ANNEXE 3

Matériaux LMB 1/500 kg influence de la zone de l'ouvrage.

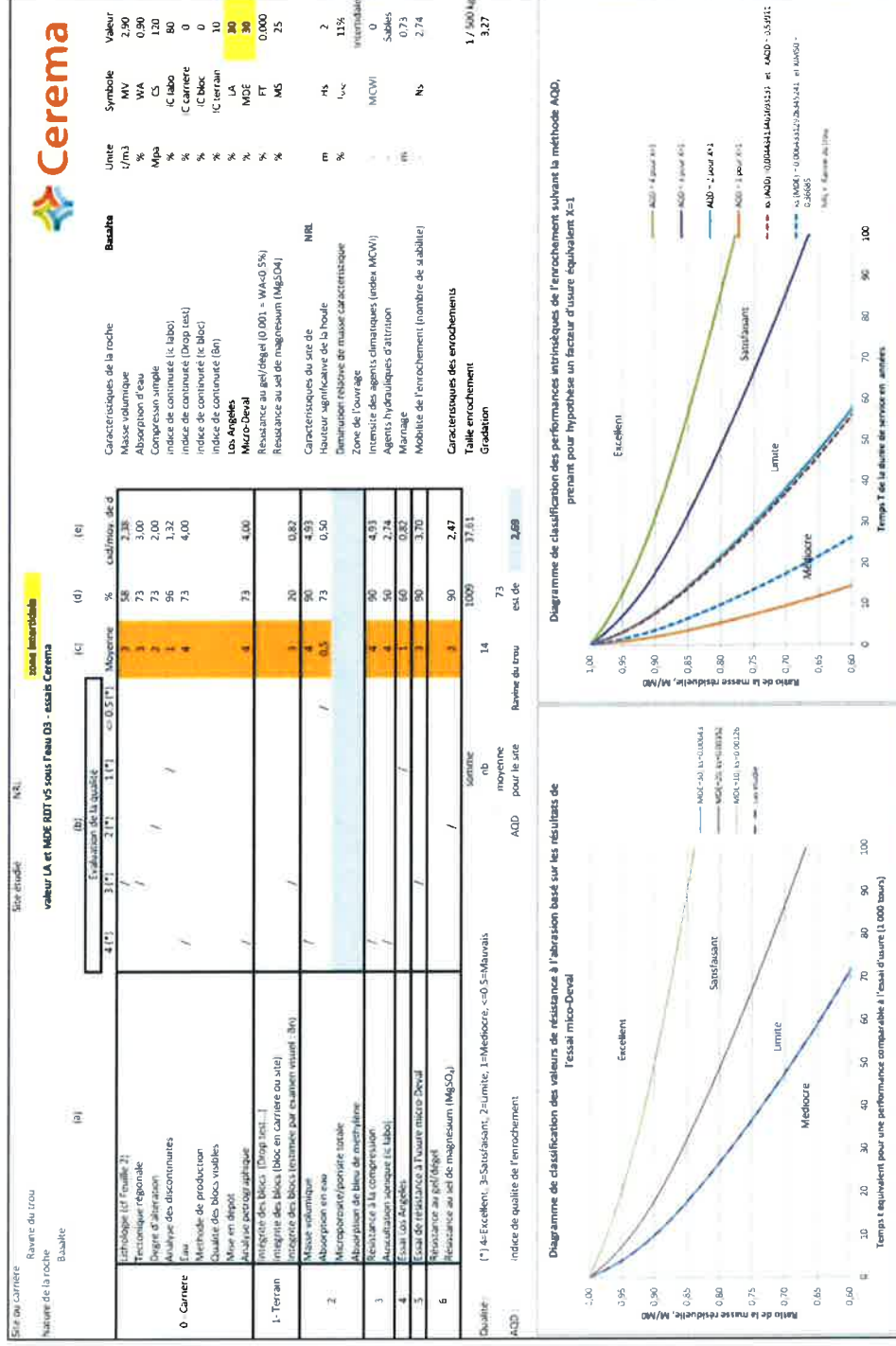
Site carrière		Site étudié		N°L	
Ravine du trou		N°L			
Nom de la roche		valeur LA et MDE RDT-V sous l'eau D3 - état à Cerema		Zone interdite	
Basalte		4 (*)		3	
		3 (*)		2 (*)	
		2 (*)		1 (*)	
		1 (*)		0 (*)	
		0 (*)		0 (*)	
0 Carrière	Indice de qualité (cf feuille Z)	3	58	2,38	
	Tension résiduelle	3	73	3,00	
	Zone d'abrasion	3	73	2,00	
	Analyse des discontinuités	1	96	1,32	
	État	4	73	4,00	
	Méthode de production				
	Qualité des blocs, visibles				
	Mise en dépôt				
	Abaissement post-concrétage				
1 Terrain	Indice des blocs (Drog N°2)	4	73	4,00	
	Indice des blocs (bloc en carrière ou site)				
	Indice des blocs (estime par examen visuel - Bn)				
2	Massif volumique	3	20	0,55	
	Absorption d'eau	4	90	4,91	
	Diminution relative de masse caractéristique	6,1	73	0,50	
4	Non réparabilité ponctuelle	3	90	3,70	
	Absorption de bloc de mortier	2	50	1,37	
	Résistance à la compression	1	50	0,82	
4	Annulation sonore (IC labo)	3	90	3,70	
	État des Angles				
5	État de résistance à l'usure micro-Deval	3	90	3,70	
	Résistance au gel/dégel				
	Résistance au sel de magnésium (MgSO ₄)				
Qualité		2	90	2,47	
ADQ		14	1009	34,73	
	Indice de qualité de l'enrochement				
	ADQ pour le site		73		
	ADQ moyenne				
	ADQ pour le site				
	Bonne du trou		73		
	est de				2,48



Caractéristiques de la roche	Basalte	Unité	Symbole	Valeur
Massif volumique		t/m ³	MV	2,90
Absorption d'eau		%	WA	0,90
Compression simple		Mpa	CS	60
Indice de continuité (IC labo)			IC labo	60
Indice de continuité (Drog N°2)			IC Carrière	0
Indice de continuité (IC bloc)			IC bloc	0
Indice de continuité (IC terrain)			IC terrain	30
Los Angeles			LA	30
Micro-Deval			MDE	30
Résistance au gel/dégel (0,001 - WA=0,5%)			FT	0,000
Résistance au sel de magnésium (MgSO ₄)			MS	25
Caractéristiques du site de				
Hauteur significative de la boue	NRL	m	r _h	2
Diminution relative de masse caractéristique		%	r ₁₀₀	11%
Zone de l'ouvrage				intermédiaire
Intensité des agents climatiques (index MCW)			MCW	0
Agents hydrauliques d'attrition				Sables
Marnage		m		0,73
Mobilité de l'enrochement (nombre de stabilité)			N _s	2,74
Caractéristiques des enrochements				
Taille enrochement				1 / 500 kg
Gradation				3,27



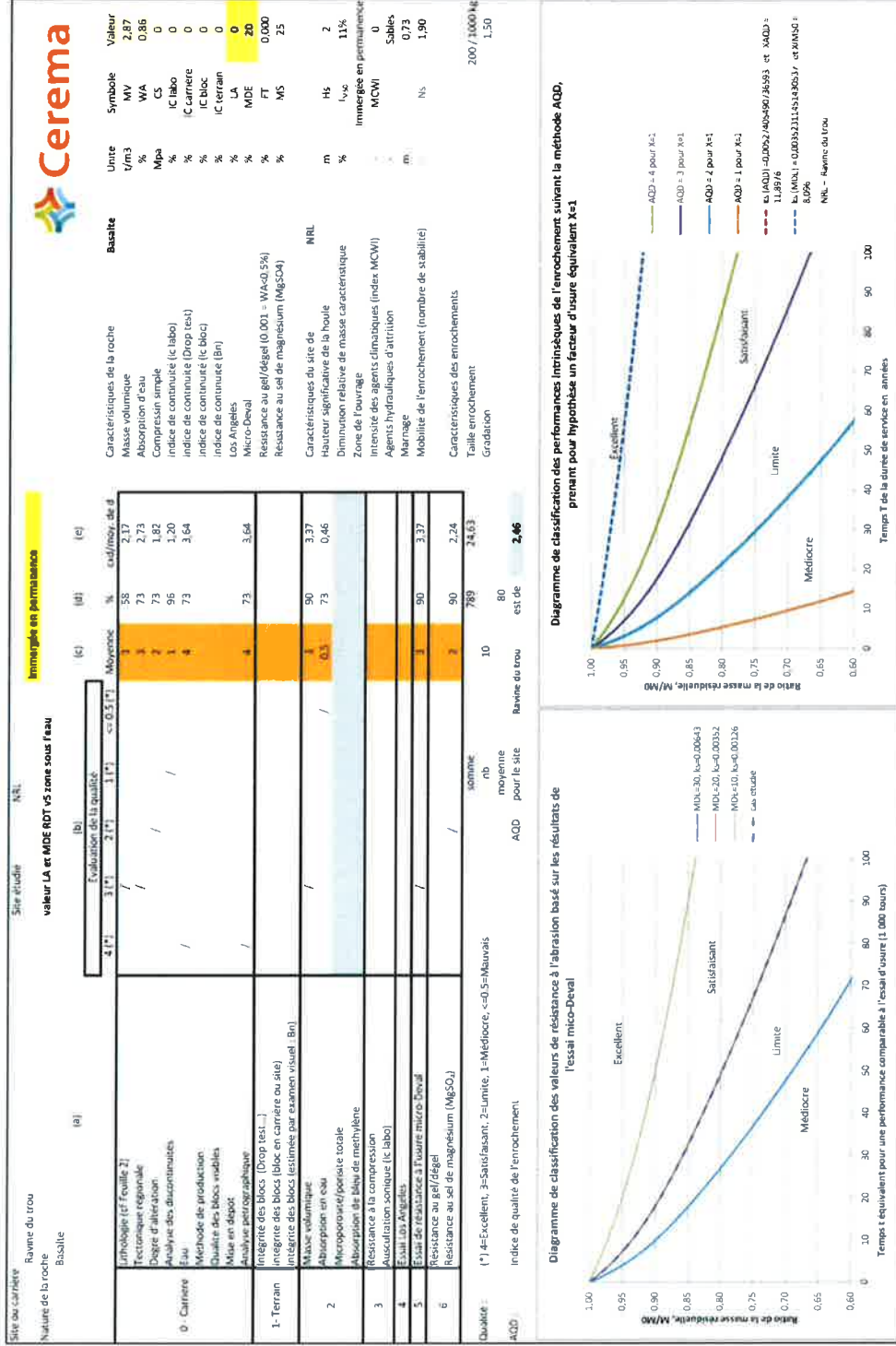
Annexe 3.1 LMB 1/500 kg – F15 : modélisation pour le LMB1/500 kg avec LA=30, MDE=30, Bn=30, CS=60 MPa, IC =60 et zone interdite



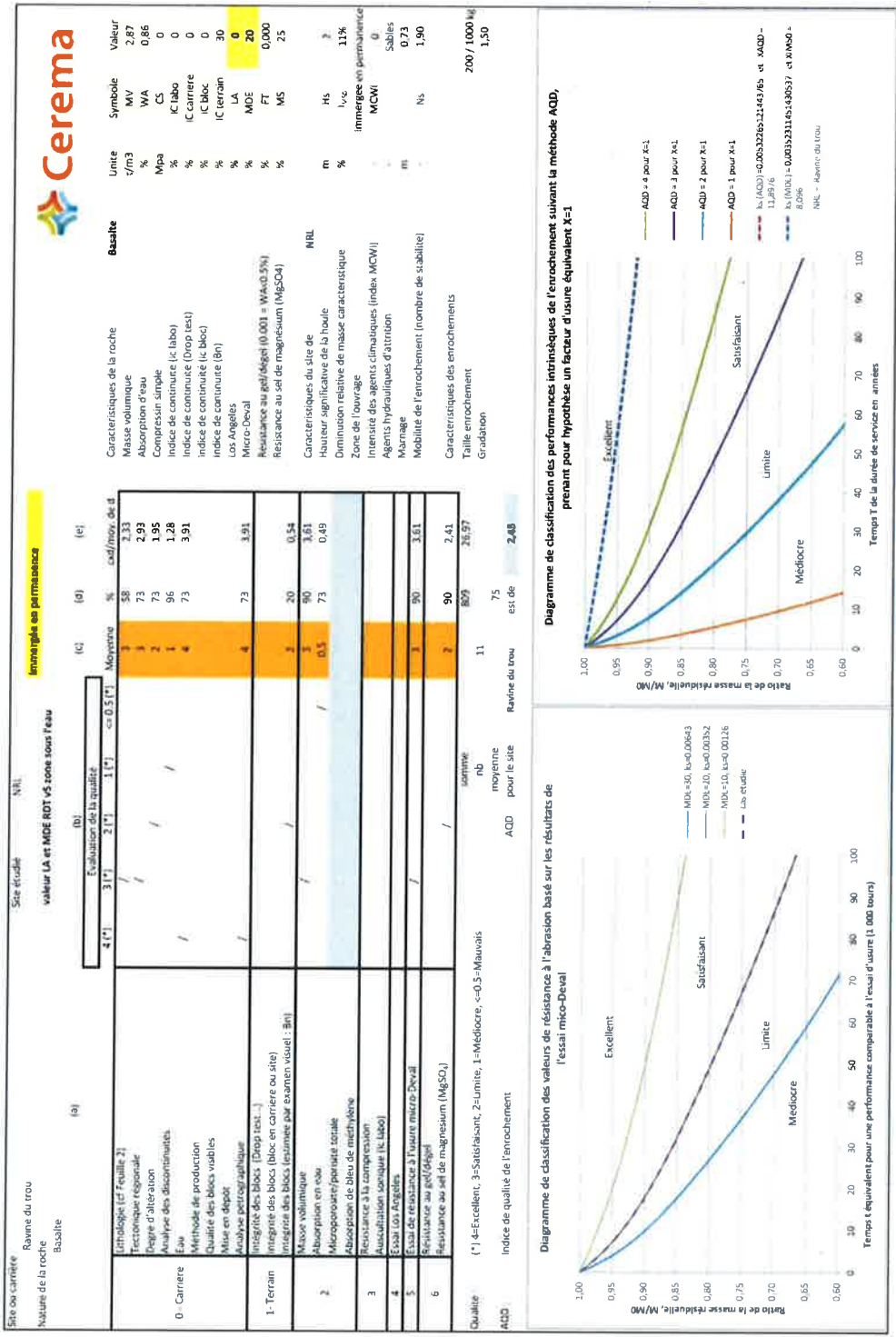
Annexe 3.2 LMB 1/500 kg – F16 : modélisation pour le LMB1/500 kg avec LA=30, MDE=30, Bn=10, CS=120 MPa, IC =80 et zone interdite

ANNEXE 4

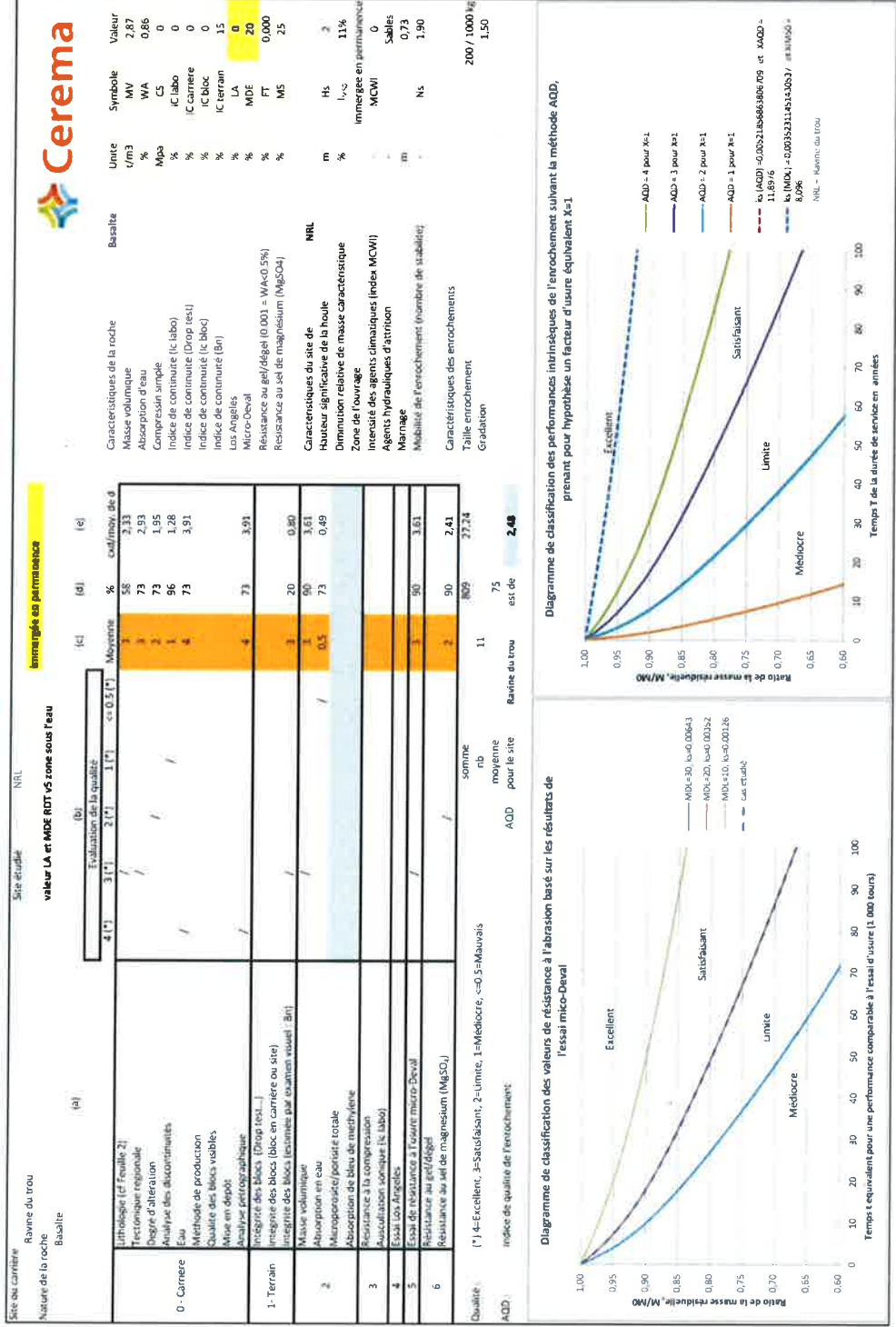
Matériaux HMA 200/1000 kg influence des paramètres Bn, Cs et IC sur la dégradation en service due à l'usure.



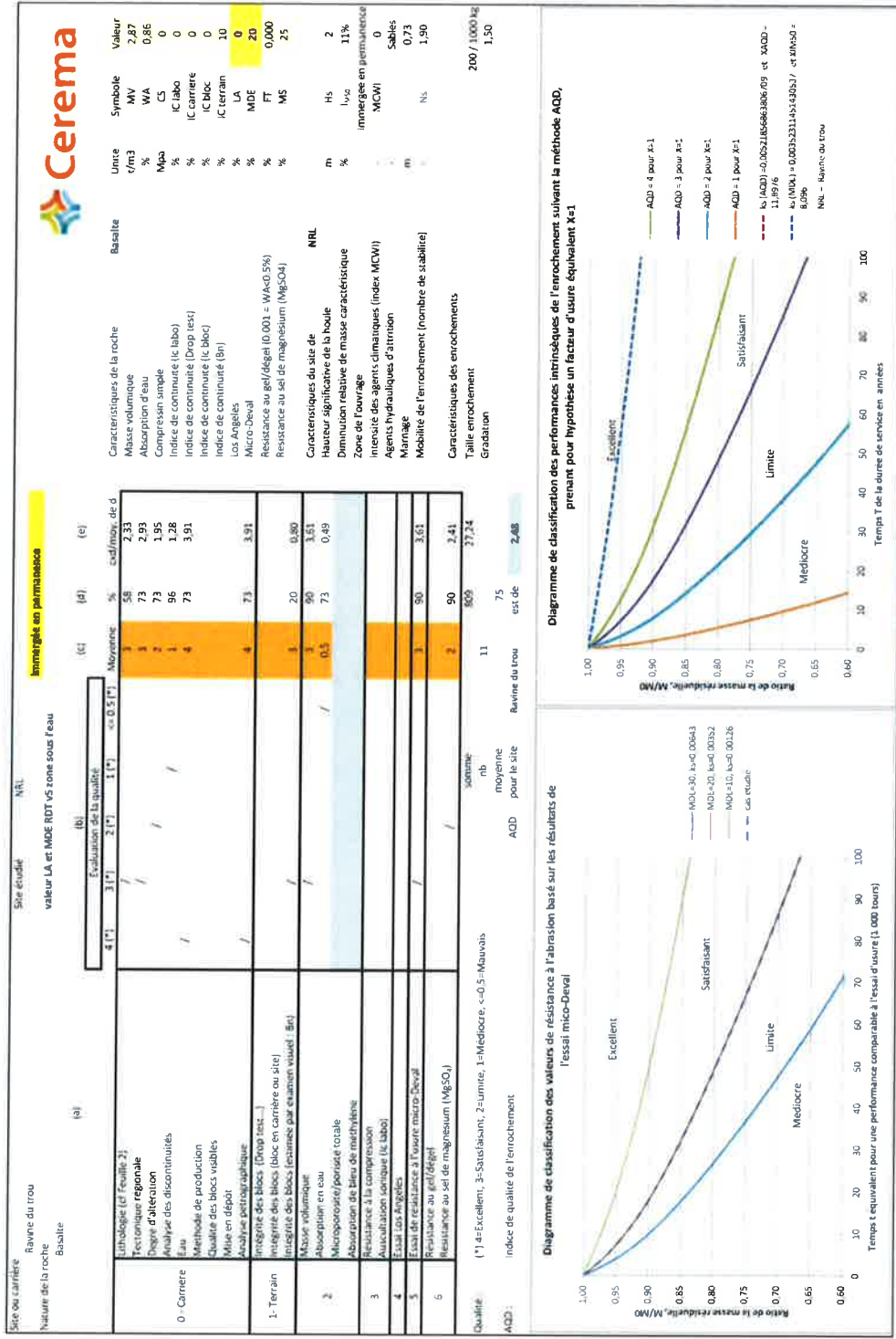
Annexe 4.1 HMA 200/1000 kg – F1 : modélisation pour le HMA200/1000 kg avec MDE=20



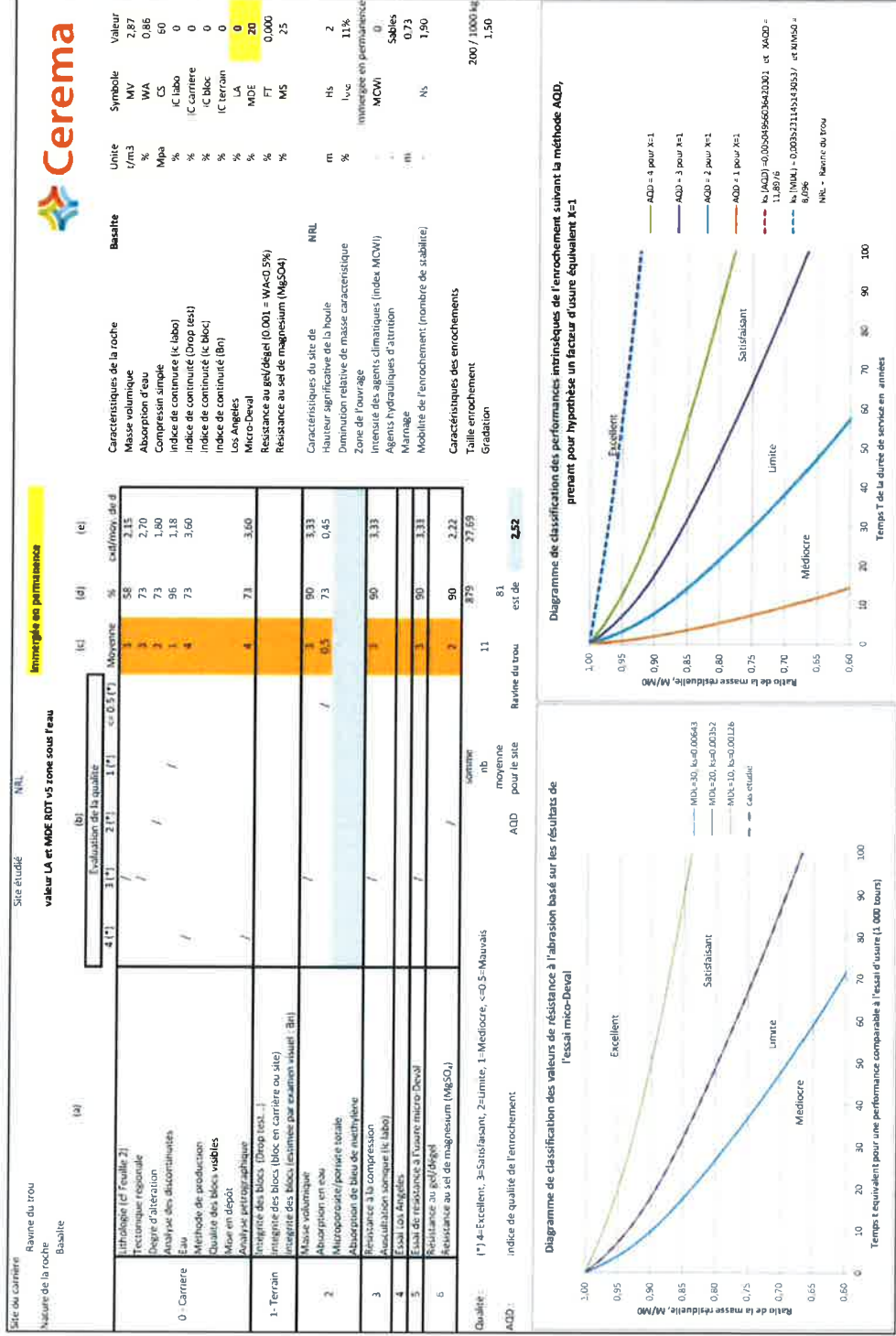
Annexe 4.2 HMA 200/1000 kg - F2 : modélisation pour le HMA200/1000 kg avec MDE=20 et Bn=30



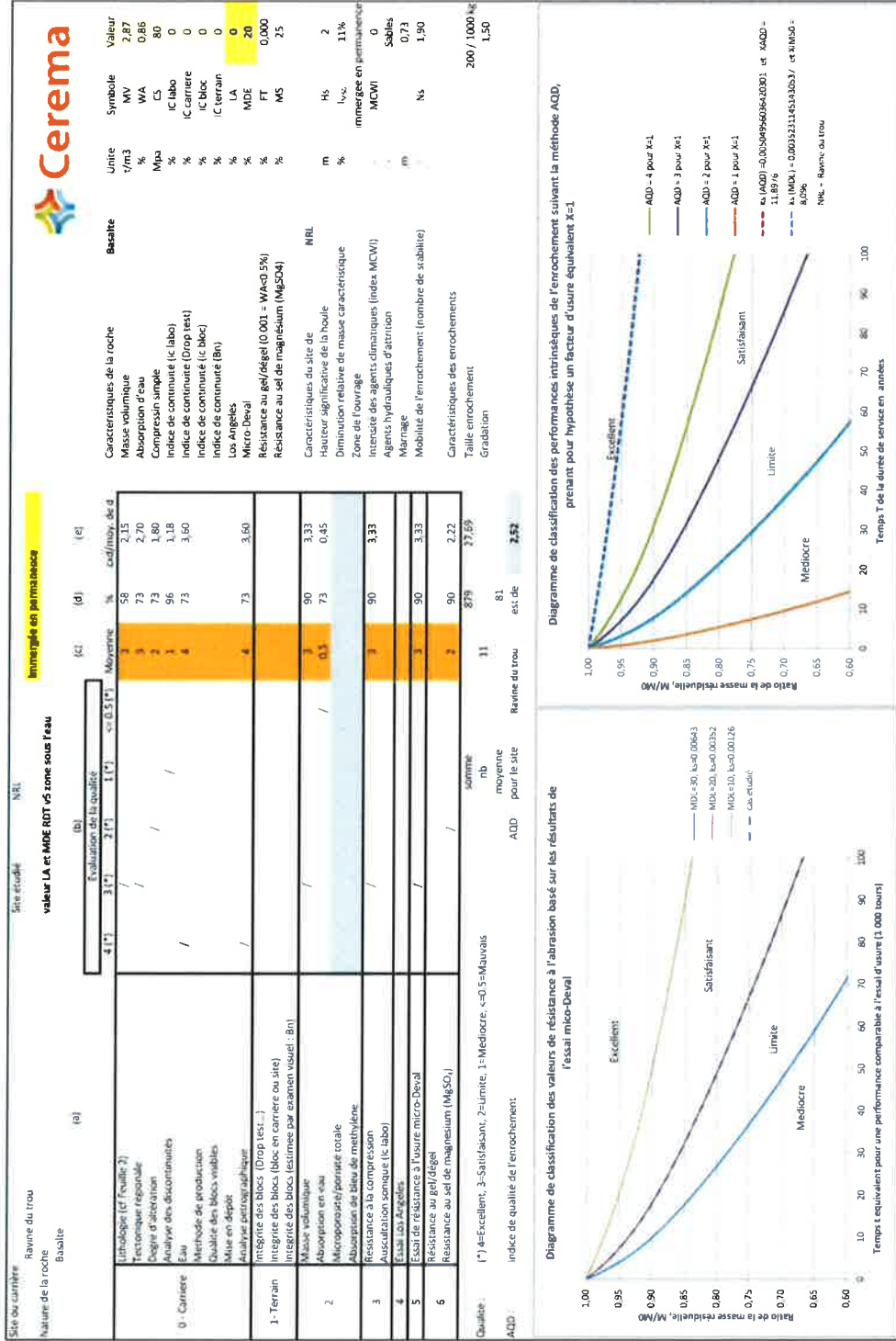
Annexe 4.3 HMA 200/1000 kg: modélisation N°F3 pour le HMA200/1000 kg avec MDE=20 et Bn=15



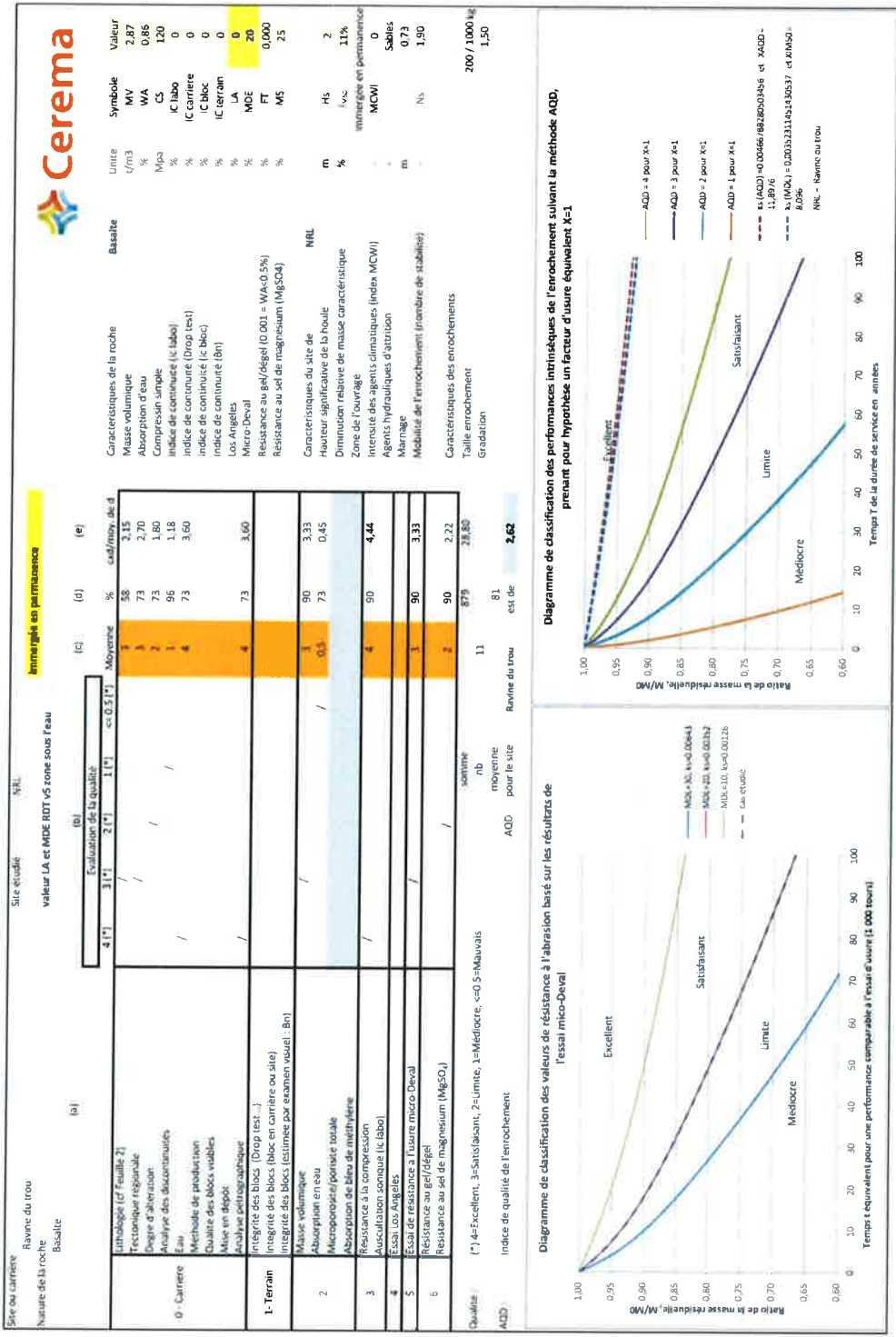
Annexe 4.4 HMA 200/1000 kg – F4 : modélisation pour le HMA200/1000 kg avec MDE=20 et Bn=10



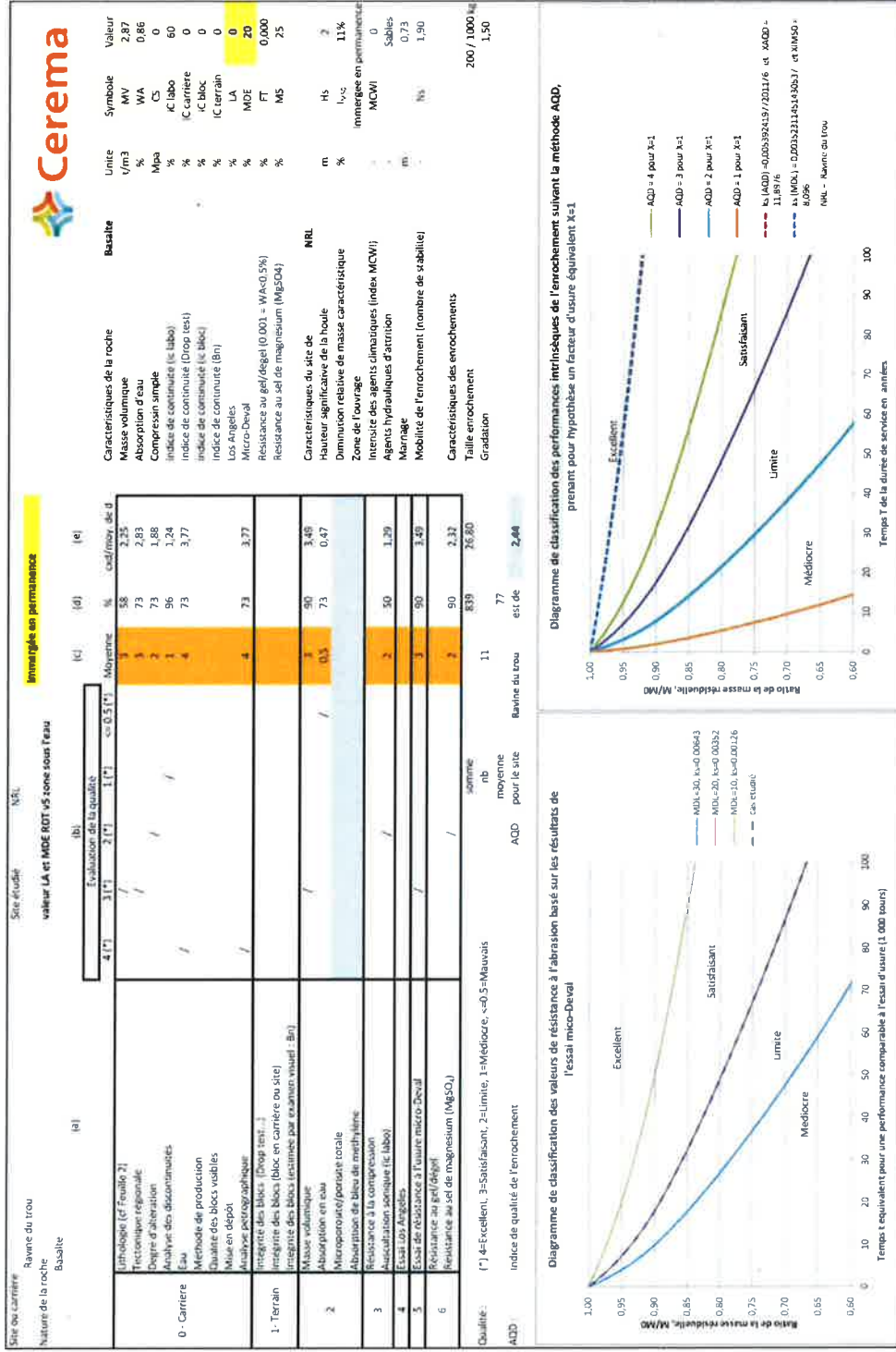
Annexe 4.5 HMA 200/1000 kg – F5 : modélisation pour le HMA200/1000 kg avec MDE=20 et CS=60 MPa



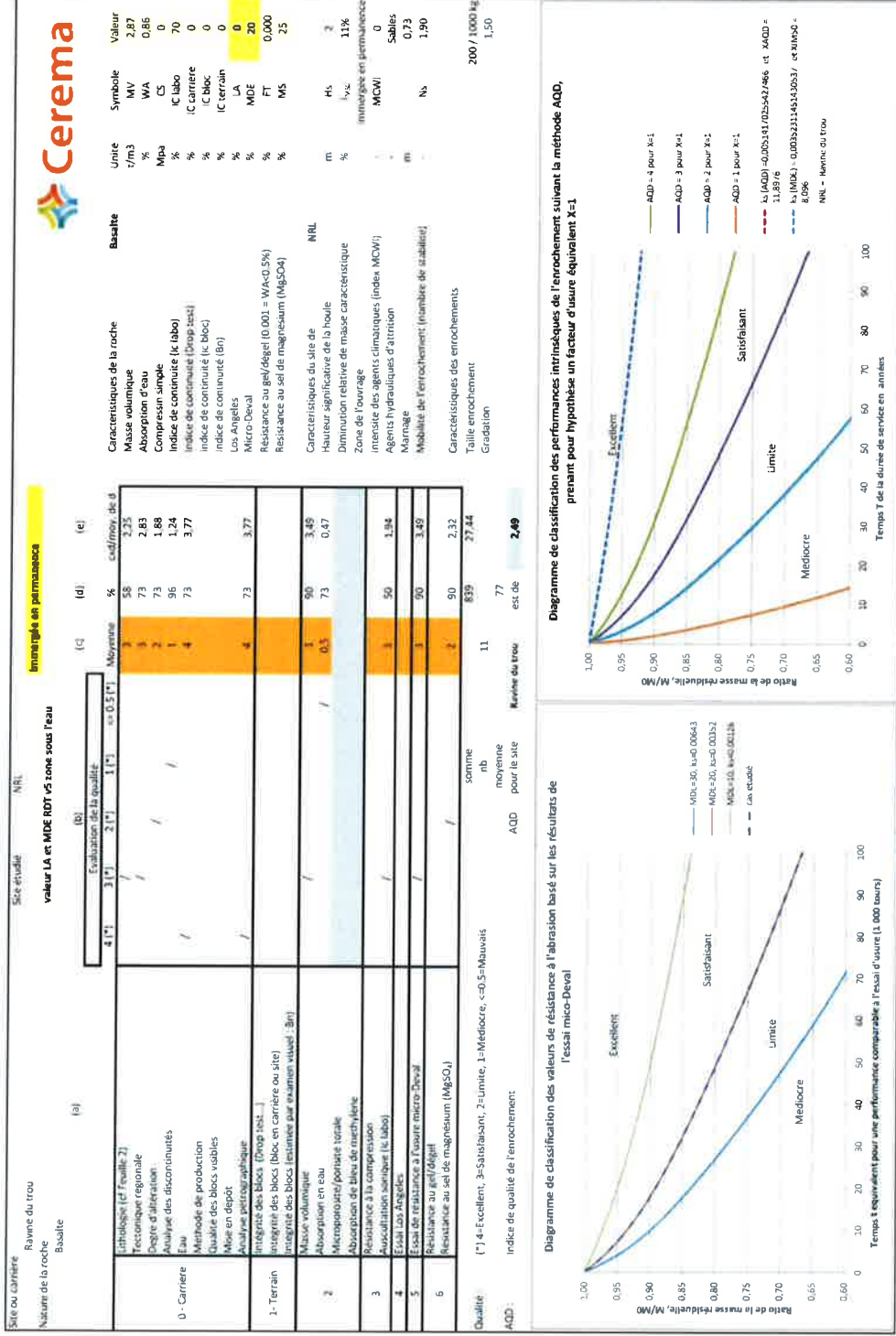
Annexe 4.6 HMA 200/1000 kg – F6 : modélisation pour le HMA200/1000 kg avec MDE=20 et CS=80 MPa



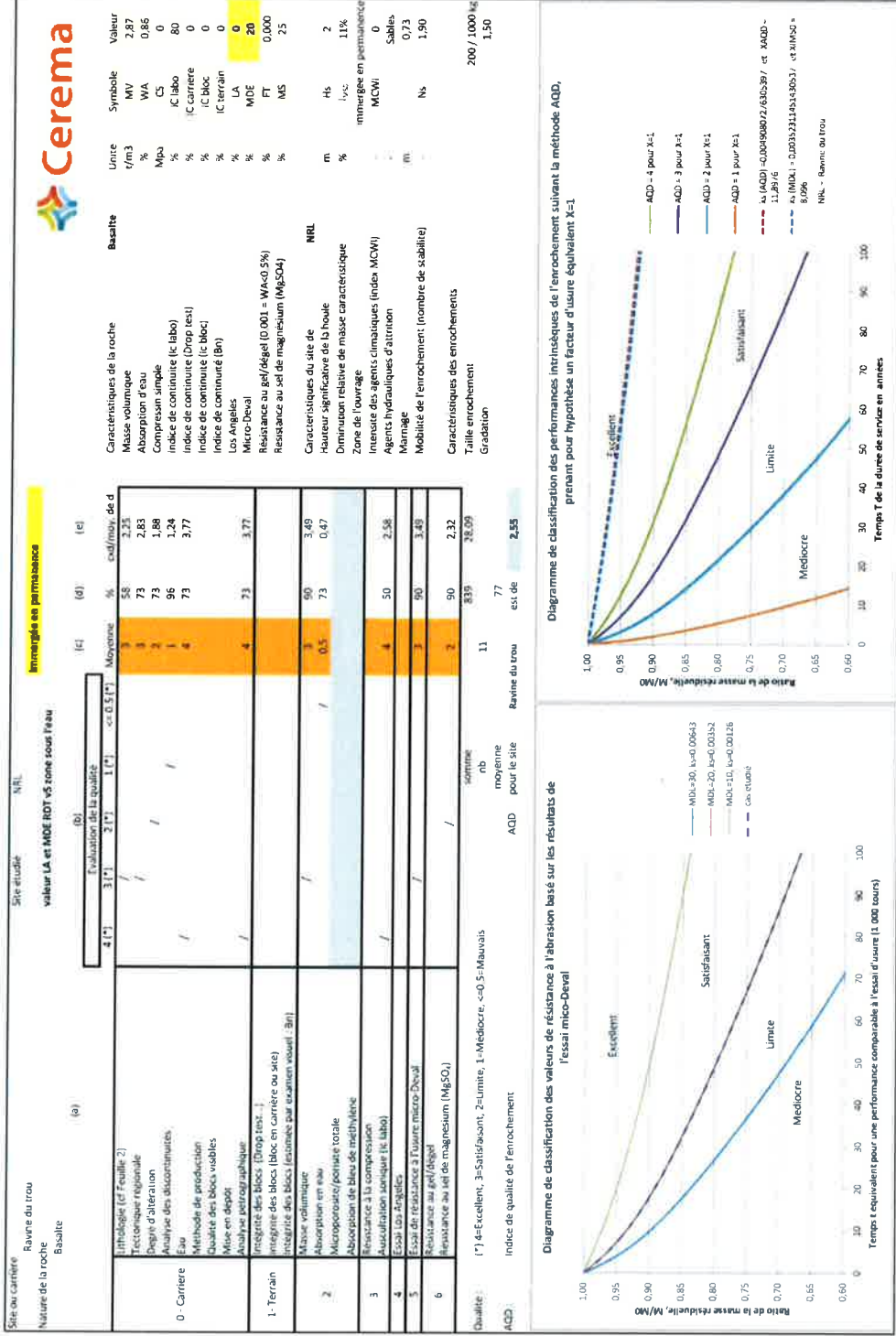
Annexe 4.7 HMA 200/1000 kg – F7 : modélisation pour le HMA200/1000 kg avec MDE=20 et CS=120 MPa



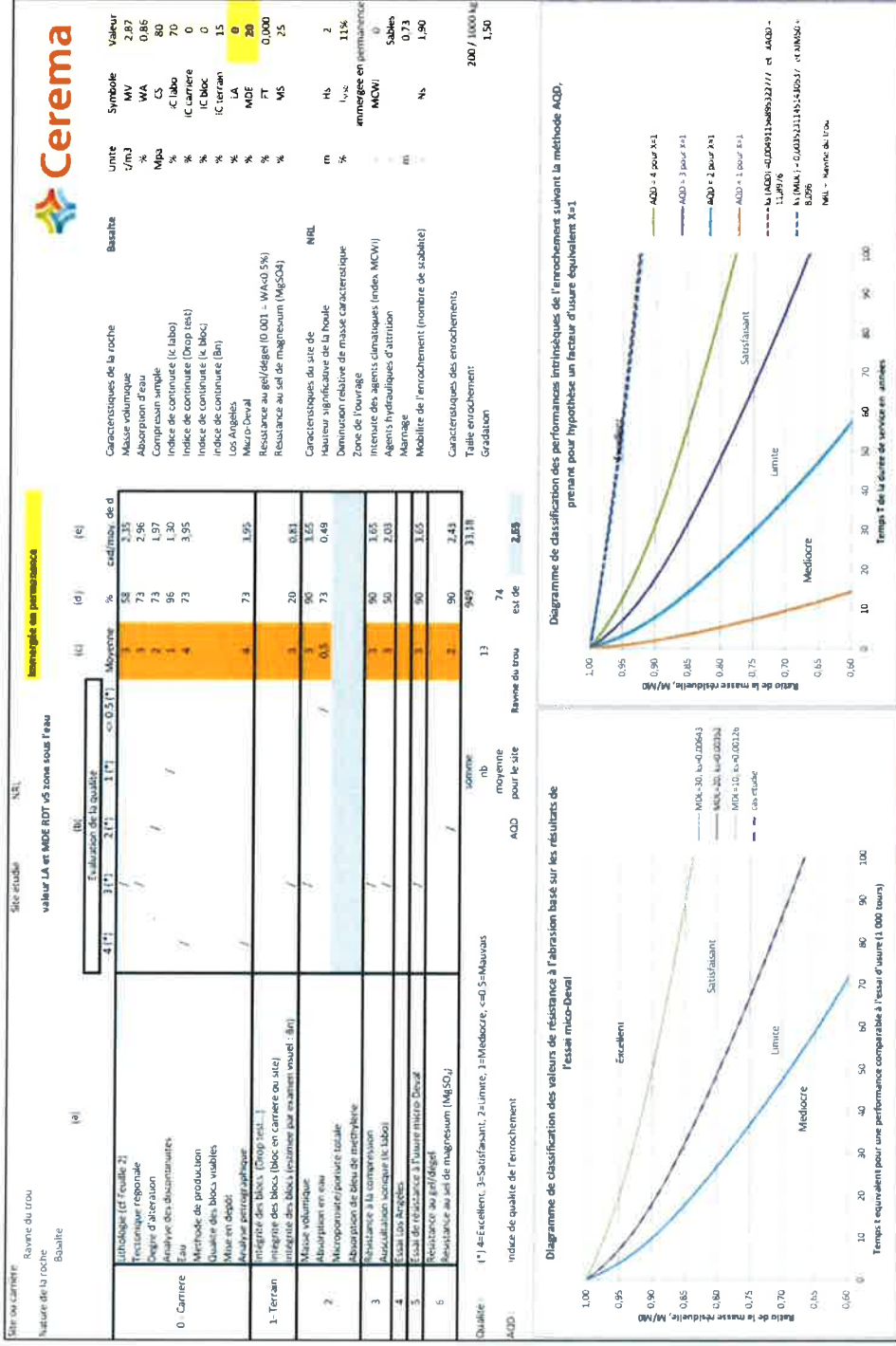
Annexe 4.8 HMA 200/1000 kg – F8 : modélisation pour le HMA200/1000 kg avec MDE=20 et IC=60



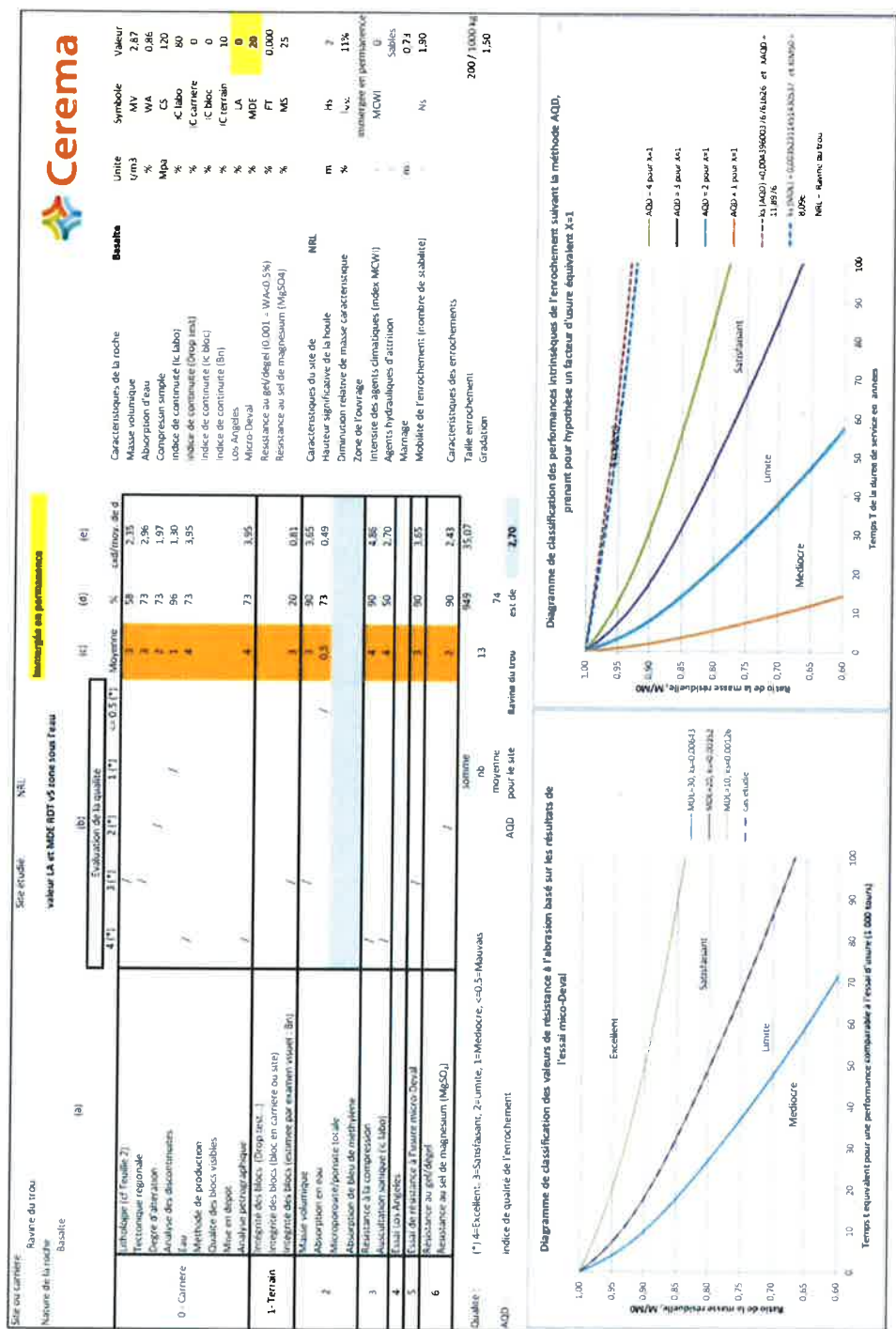
Annexe 4.9 HMA 200/1000 kg – F9 : modélisation pour le HMA200/1000 kg avec MDE=20 et IC=70



Annexe 4.10 HMA 200/1000 kg – F10 : modélisation pour le HMA200/1000 kg avec MDE=20 et IC=80



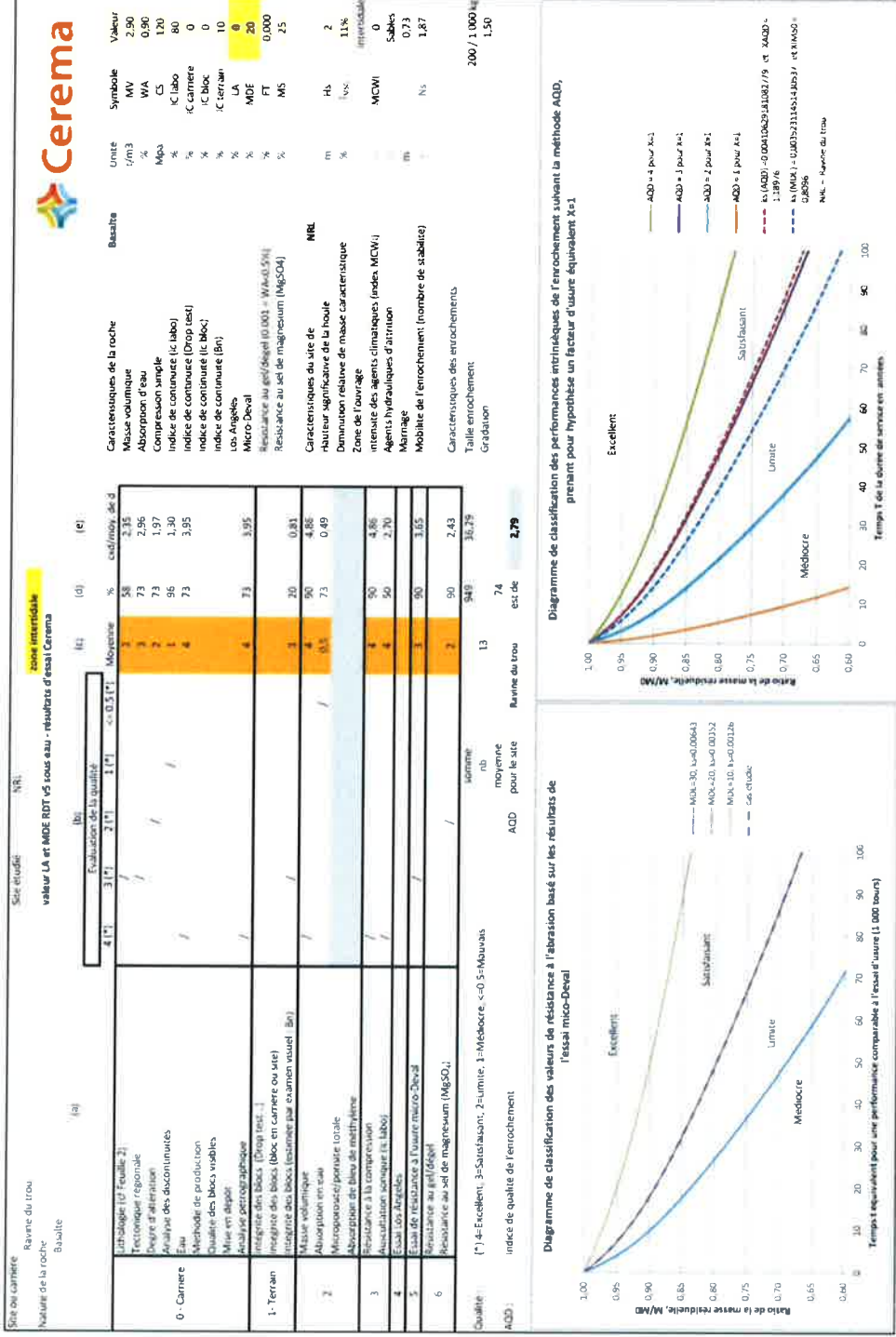
Annexe 4.11 HMA 200/1000 kg – F11 : modélisation pour le HMA200/1000 kg avec MDE=20 et Bn=15, CS=80 MPa et IC=70



Annexe 4.12 HMA 200/1000 kg – F12 : modélisation pour le HMA 200/1000 kg avec MDE=20 et Bn=10, CS=120 MPa et IC=80

ANNEXE 5

**Matériaux HMA 200/1000 kg influence
de la zone de l'ouvrage.**



Annexe 5.2 HMA 200/1000 kg – F14 : modélisation pour le HMA200/1000 kg avec MDE=20, Bn=10 CS=120 MPa IC=80 et zone intertidale

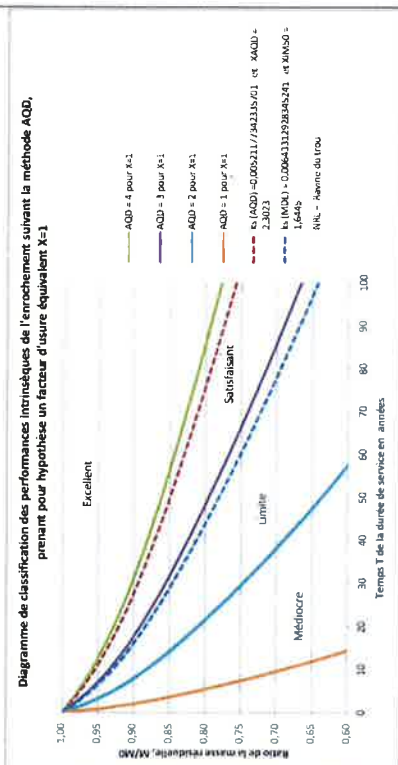
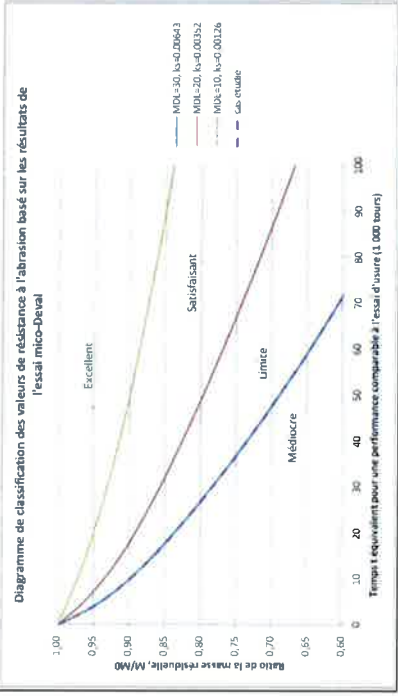
ANNEXE 6

**Matériaux CP 0/300 mm cas A - LA=35
et MDE=30.**

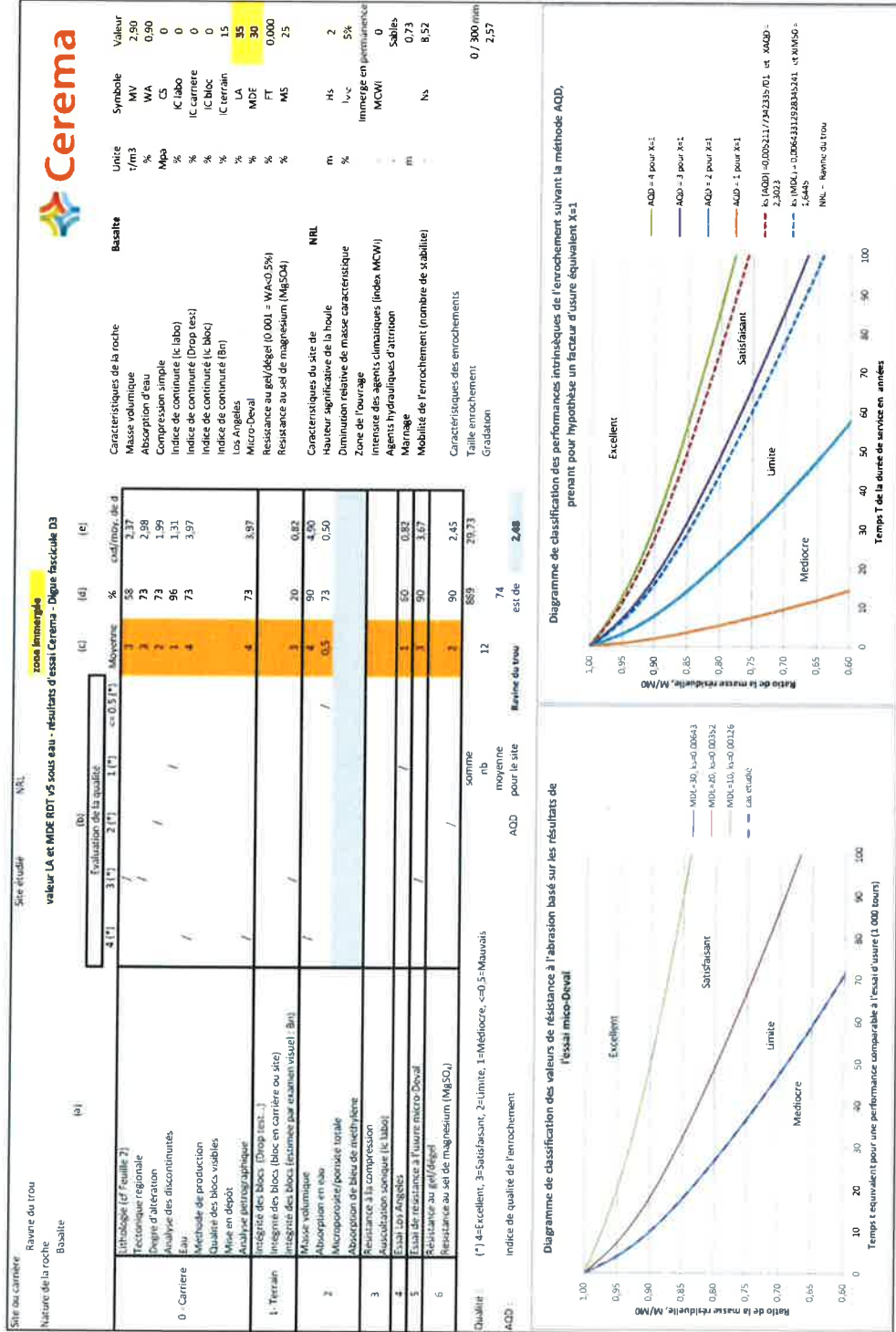
Site ou carrière		Site étudié		NRL		
Ravine du trou		valeur LA et MDE ROT VS sous eau - résultats d'essai Cerema - Digue fascicule D3		Zone laminar/gé		
Nature de la roche		Basalte				
0 - Carrière	Lithologie (cf Famille 2)	4 (*)	3 (*)	2 (*)	1 (*)	
	Tectonique régionale	/	/	/	/	
	Degré d'altération	/	/	/	/	
	Analyse des discontinuités	/	/	/	/	
	Eau	/	/	/	/	
	Méthode de production	/	/	/	/	
1 - Terrain	Qualité des blocs visibles	4	4	73	3,97	
	Mise en dépôt	/	/	/	/	
	Analyse pétrographique	/	/	/	/	
	Intégrité des blocs (Drop test...)	4	4	73	3,97	
	Intégrité des blocs (bloc en carrière ou site)	/	/	/	/	
	Intégrité des blocs (testé par examen visuel - Bit)	/	/	/	/	
2	Masse volumique	/	/	1	20	
	Absorption en eau	/	/	4	90	
	Microporosité/porosité totale	/	/	0,5	73	
	Absorption de bleu de méthylène	/	/	/	/	
	Résistance à la compression	/	/	/	/	
	Auséultation sonore (t. labo)	/	/	/	/	
3	Essai Los Angeles	/	/	1	50	
	Essai de résistance à l'usure micro-Deval	/	/	1	50	
	Résistance au gel/dégel	/	/	1	90	
	Résistance au sel de magnésium (MgSO ₄)	/	/	1	90	
	Qualité	(*) 4=Excellent, 3=Satisfaisant, 2=Limite, 1=Médiocre, <0,5=Mauvais	somme		859	29,73
	ADQ	indice de qualité de l'enrochement	ADQ pour le site	74	est de	2,48



Caractéristiques de la roche	Basalte	Unité	Symbole	Valeur
Masse volumique		t/m ³	MV	2,90
Absorption d'eau		%	WA	0,90
Compression simple		Mpa	CS	0
Indice de continuité (t. labo)		%	IC Labo	0
Indice de continuité (Drop test)		%	IC Carrière	0
Indice de continuité (t. bloc)		%	IC bloc	0
Indice de continuité (t. Ben)		%	IC terrain	10
Los Angeles		%	LA	35
Micro-Deval		%	MDE	30
Résistance au gel/dégel (0,001 - NA<0,5%)		%	FT	0,000
Résistance au sel de magnésium (MgSO ₄)		%	MS	25
Caractéristiques du site de	NRL	m	HS	2
Hauteur significative de la houille		%	h _{vc}	5%
Diminution relative de masse caractéristique		%	Immorté en pourcentage	
Zone de l'ouvrage			MCW	0
Intensité des agents climatiques (index MCW)				Sables
Agents hydrauliques d'attrition		m	Ns	0,73
Marriage				8,57
Mobilité de l'enrochement (nombre de stabilité)				0 / 300 mm
Caractéristiques des enrochements				2,57
Taille enrochement				
Gradation				



Annexe 6.1 CP 0/300 mm – F1 : modélisation pour le CP 0/300mm avec LA=35, MDE=30 et Bn=10



Qualité : (*) 4=Excellent, 3=Satisfaisant, 2=Limite, 1=Mediocre, <0,5=Maussais

indice de qualité de l'enrochement : somme n/b = 12 / moyenne = 74

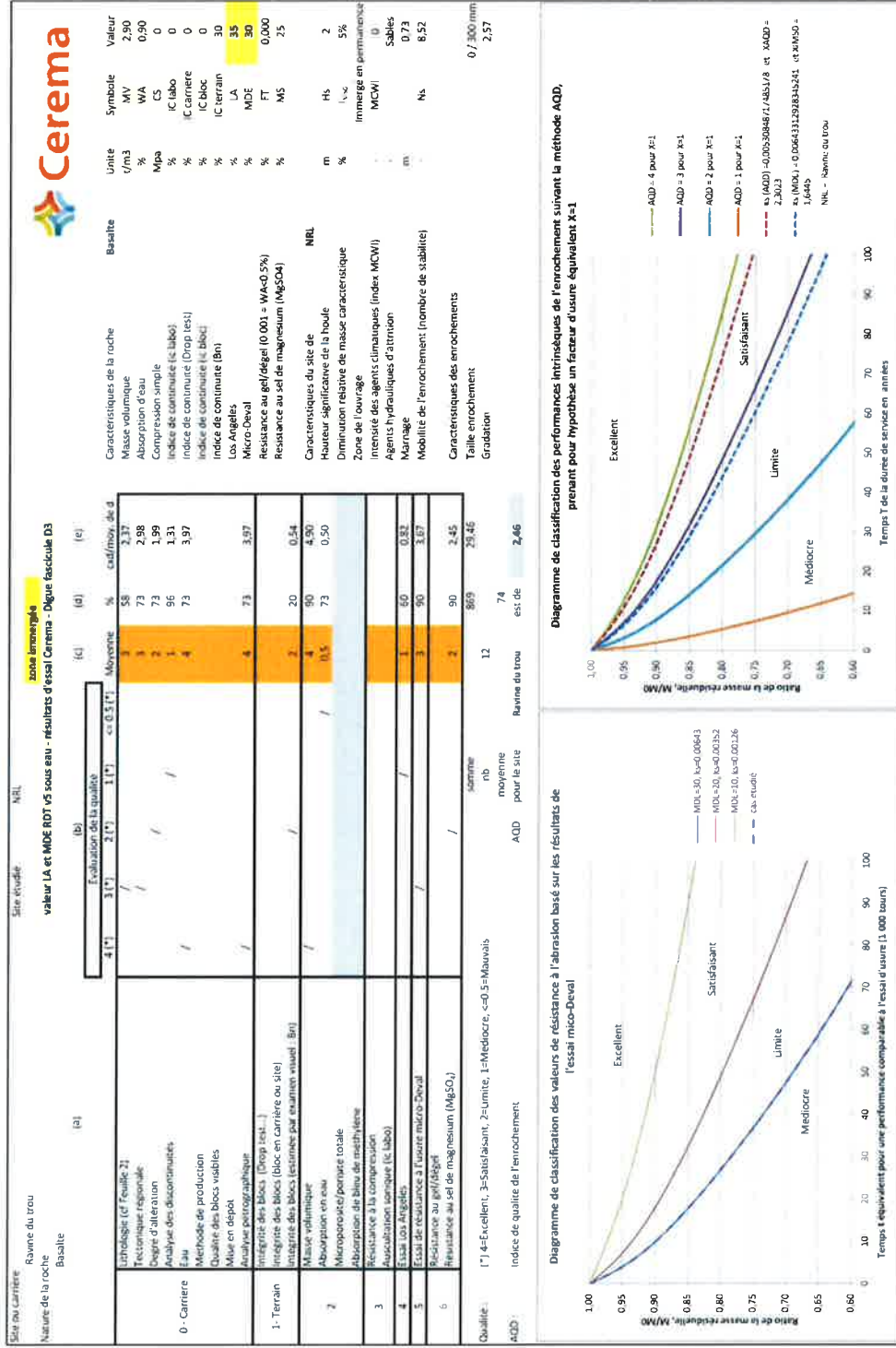
ACQ pour le site : Ravine du trou est de 2,48

Diagramme de classification des performances intrinsèques de l'enrochement suivant la méthode AQD, prenant pour hypothèse un facteur d'usure équivalent X=1

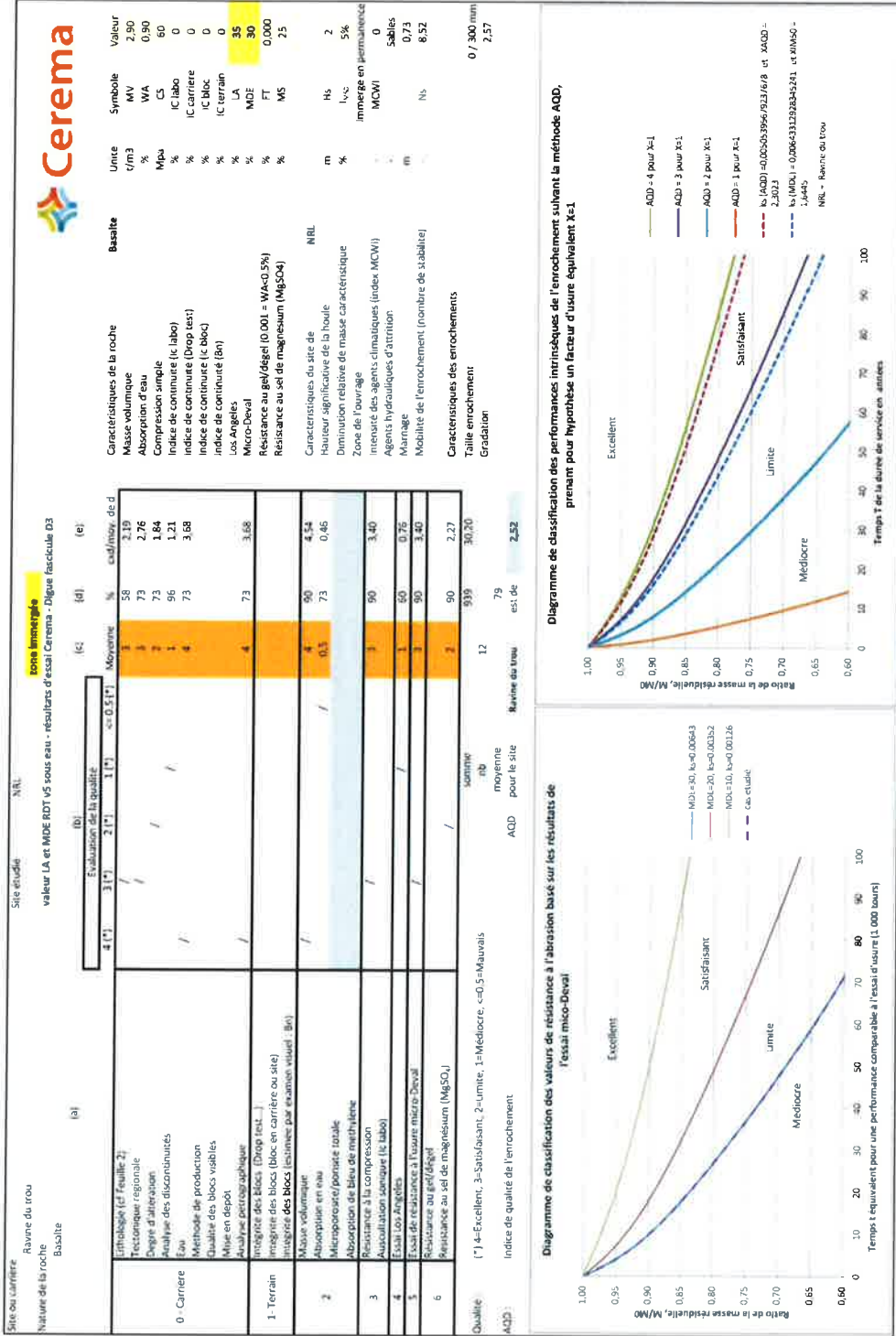
Diagramme de classification des valeurs de résistance à l'abrasion basé sur les résultats de l'essai micro-Dovul

Diagramme de classification des performances intrinsèques de l'enrochement suivant la méthode AQD, prenant pour hypothèse un facteur d'usure équivalent X=1

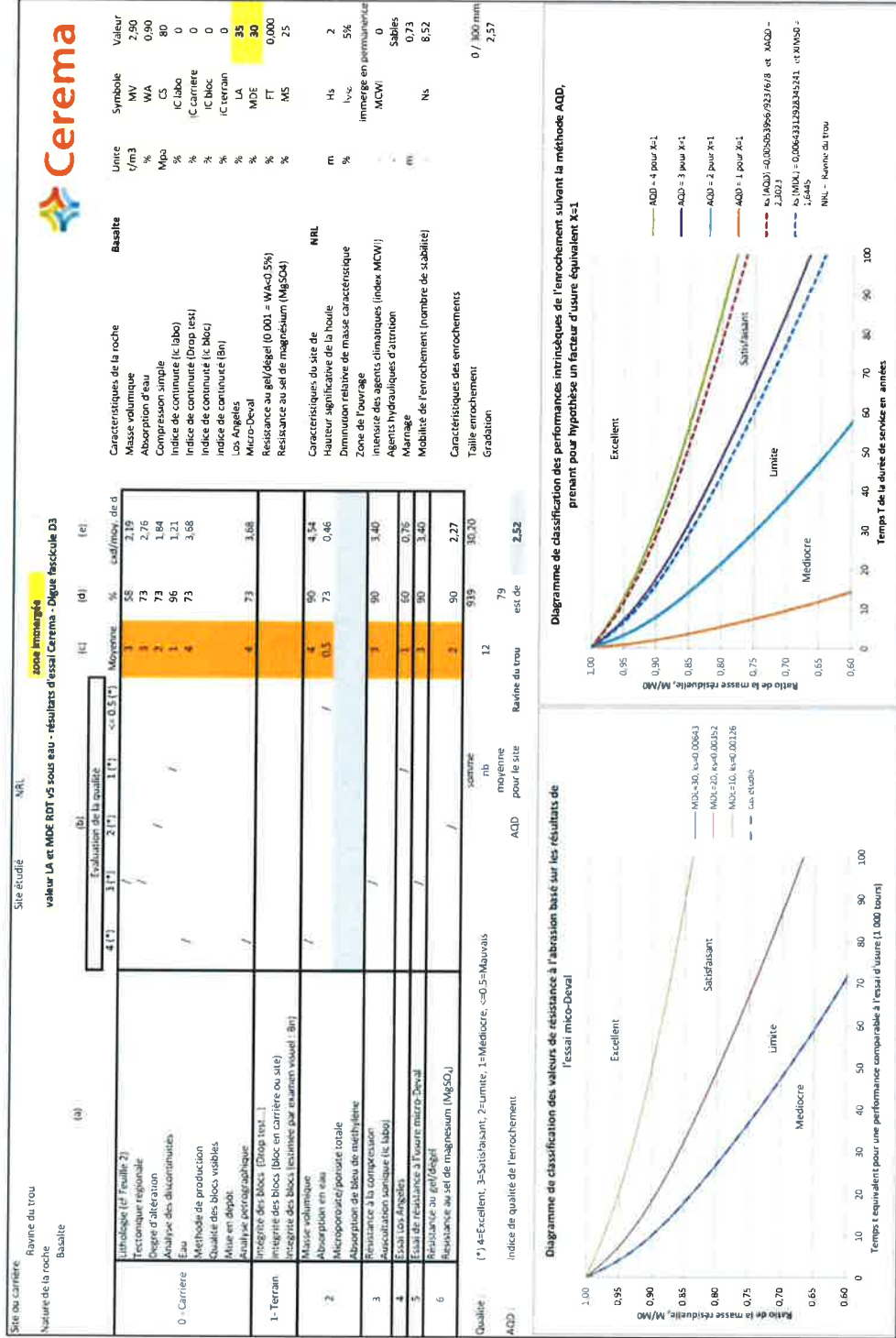
Annexe 6.2 CP 0/300 mm – F2 : modélisation pour le CP 0/300mm avec LA=35, MDE=30 et Bn=15



Annexe 6.3 CP 0/300 mm – F3 : modélisation pour le CP 0/300mm avec LA=35, MDE=30 et Bn=30

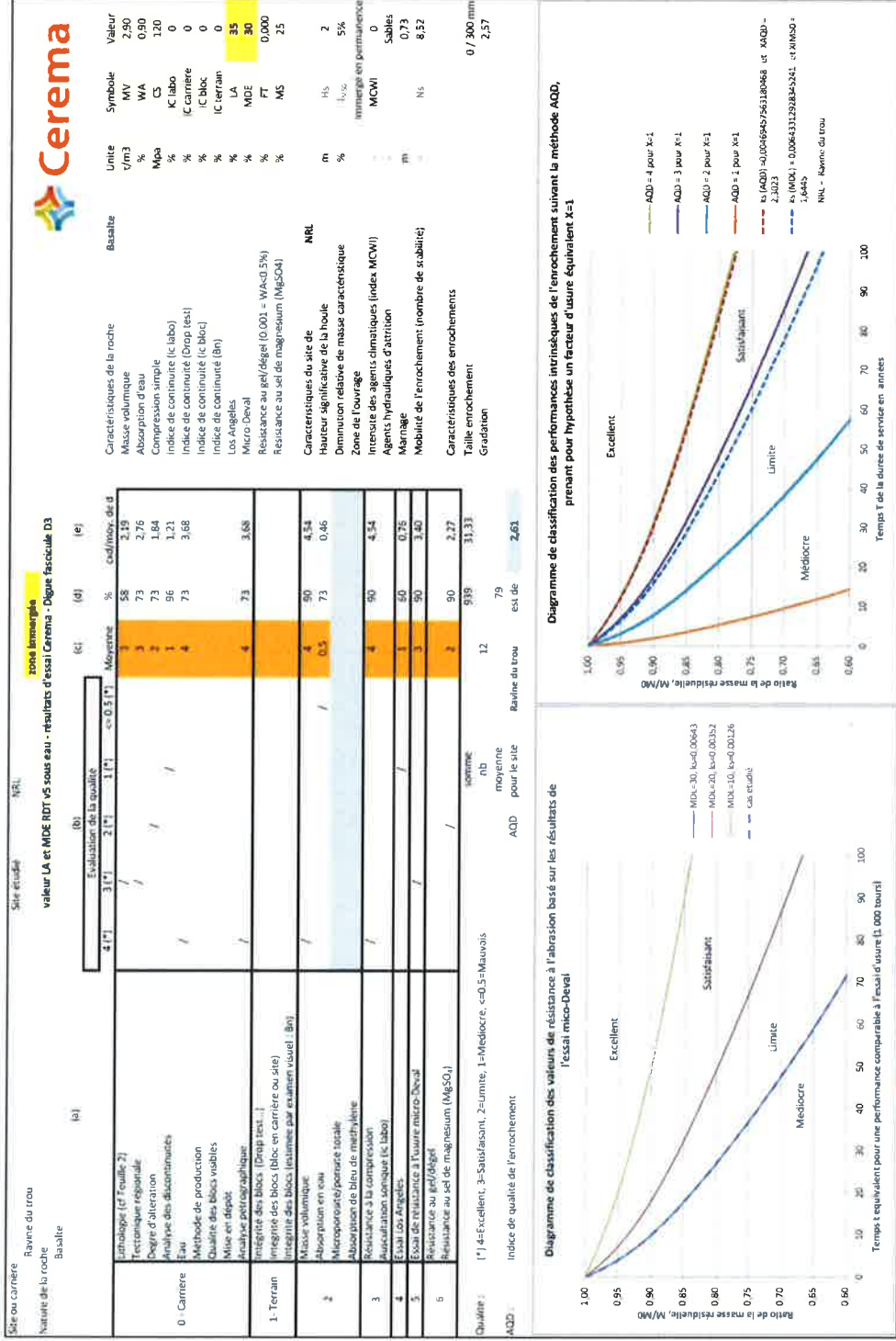


Annexe 6.4 CP 0/300 mm – F4 : modélisation pour le CP 0/300mm avec LA=35, MDE=30 et CS=60 MPa



Annexe 6.5 CP 0/300 mm – F5 : modélisation pour le CP 0/300mm avec LA=35, MDE=30 et CS=80 MPa

C160A0356 -Expertise des matériaux de la future carrière de la Ravine du Trou à la Réunion – Rapport phase A



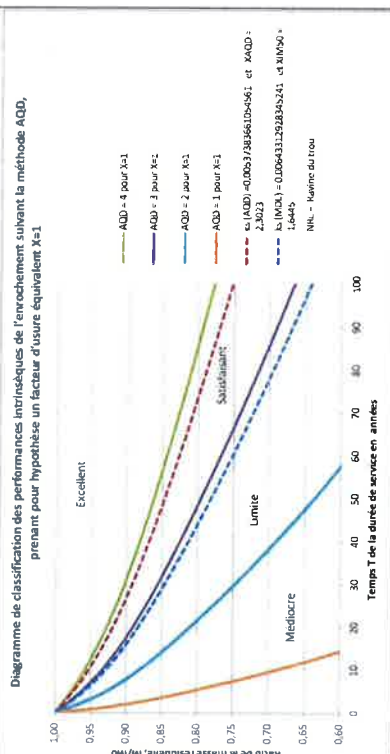
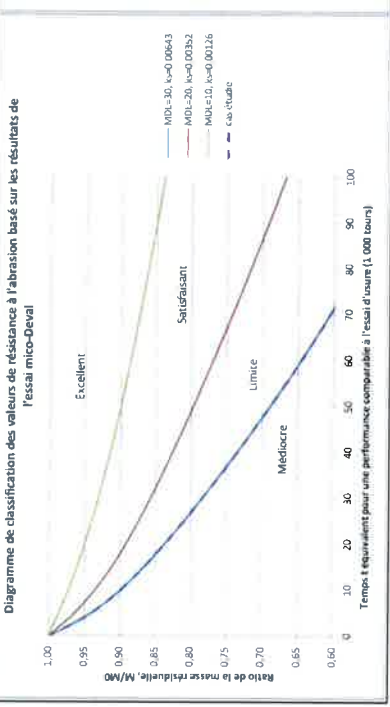
Annexe 6.6 CP 0/300 mm – F6 : modélisation pour le CP 0/300mm avec LA=35, MDE=30 et CS=120 MPa

Site ou carrière		Site étudié		NRL		
Ravine du trou		zone immergée		valeur LA et MDE RDT v5 sous eau - résultats d'essai Cerema - Digie fascicule D3		
Nature de la roche		Basalte				
0 - Carrière	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	
	Évaluation de la qualité		Moyenne		cat./moy. de d	
	1	3 (*)	2 (*)	1 (*)	58	2,79
	2	3 (*)	1 (*)	1 (*)	73	2,88
	3	3 (*)	1 (*)	1 (*)	73	1,92
	4	3 (*)	1 (*)	1 (*)	96	1,26
5	3 (*)	1 (*)	1 (*)	73	3,84	
6	3 (*)	1 (*)	1 (*)	73	3,84	
1 - Terrain	Intégrité des blocs (Drop test) / Intégrité des blocs (bloc en carrière ou site) / Intégrité des blocs (examen visuel - Bin)		4	90	4,74	
2	Masse volumique / Absorption en eau / Microprobes porosités totale		4	90	0,48	
3	Absorption à la compression / Absorption sur bleu de méthylène / Résistance à la compression / Absorption sur blanc (c labo)		0,5	73	0,48	
4	Essai de résistance à l'usure micro-Deval / Résistance au gel/dégel		2	50	1,32	
5	Essai de résistance à l'usure micro-Deval / Résistance au gel/dégel		1	50	0,79	
6	Essai de résistance à l'usure micro-Deval / Résistance au gel/dégel		3	90	1,55	
Qualité	Indice de qualité de l'enrochement		12	899	29,28	
AQD	somme		no	76	2,44	
	ACD pour le site		est de			

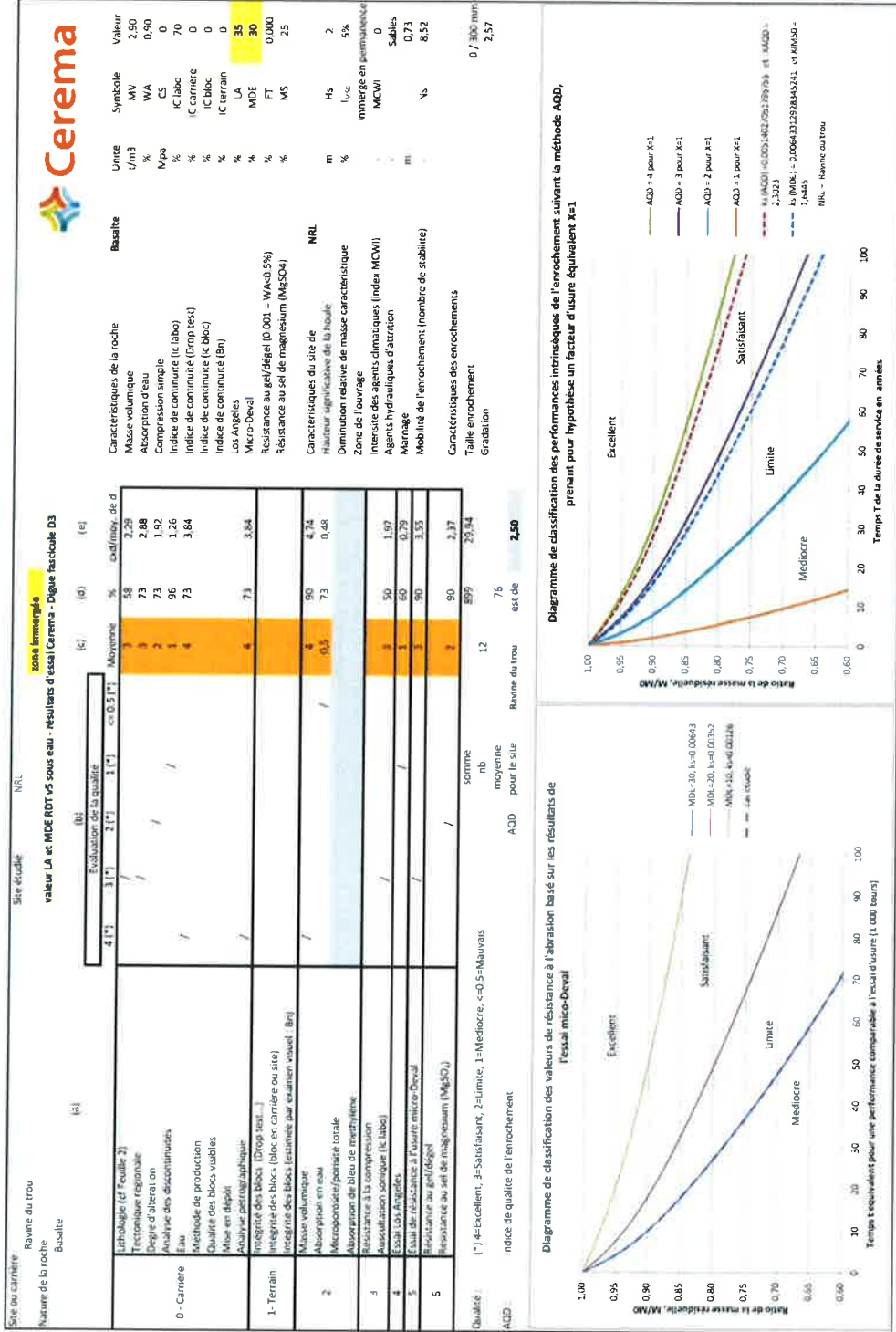


Caractéristiques de la roche	Unité	Valeur
Masse volumique	MV	2,90
Absorption d'eau	WA	0,50
Compression simple	CS	0
indice de contrainte (c labo)	c labo	60
indice de contrainte (Drop test)	IC carrière	0
indice de contrainte (c bloc)	IC bloc	0
indice de contrainte (Bin)	IC terrain	0
Los Angeles	LA	35
Macro-Déval	MDE	30
Resistance au gel/dégel (0 001 - WAC0 5%)	FT	0,000
Resistance au sel de magnésium (MgSO4)	M5	25

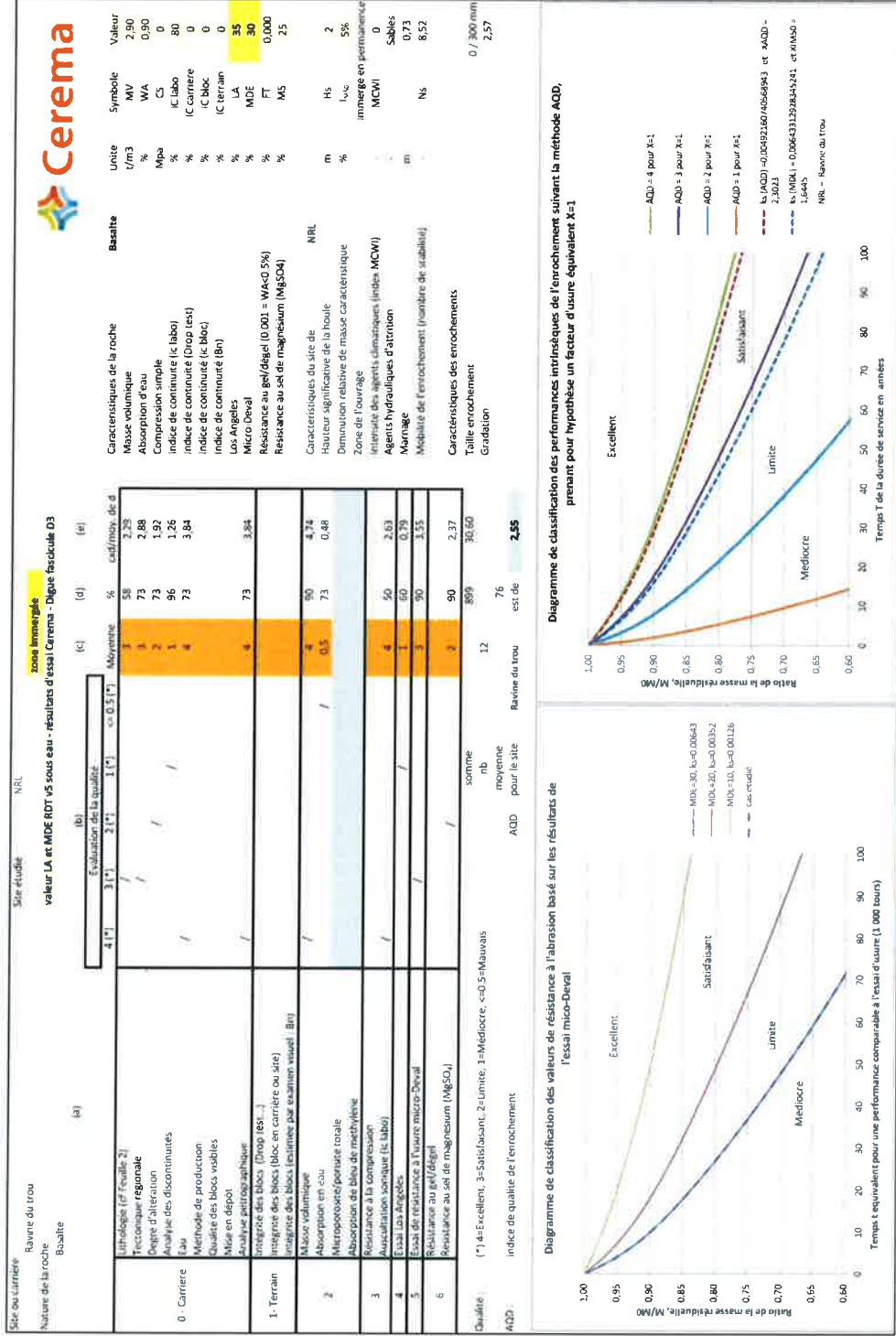
Caractéristiques du site de	Unité	Valeur
Hauteur significative de la houille	Hs	2
Diminution relative de masse caractéristique	lvx	5%
Zone de l'ouvrage	Immersion en permanence	
Intensité des agents climatiques (index MCWI)	MCWI	0
Agents hydrauliques d'airtrion	Sables	0,73
Marinage	Ns	8,52
Mobilité de l'enrochement (nombre de stabilité)		
Caractéristiques des enrochements		
Taille enrochement		0 / 300 mm
Grabation		2,57



Annexe 6.7 CP 0/300 mm – F7 : modélisation pour le CP 0/300mm avec LA=35, MDE=30 et IC=60



Annexe 6.8 CP 0/300 mm – F8 : modélisation pour le CP 0/300mm avec LA=35, MDE=30 et IC=70

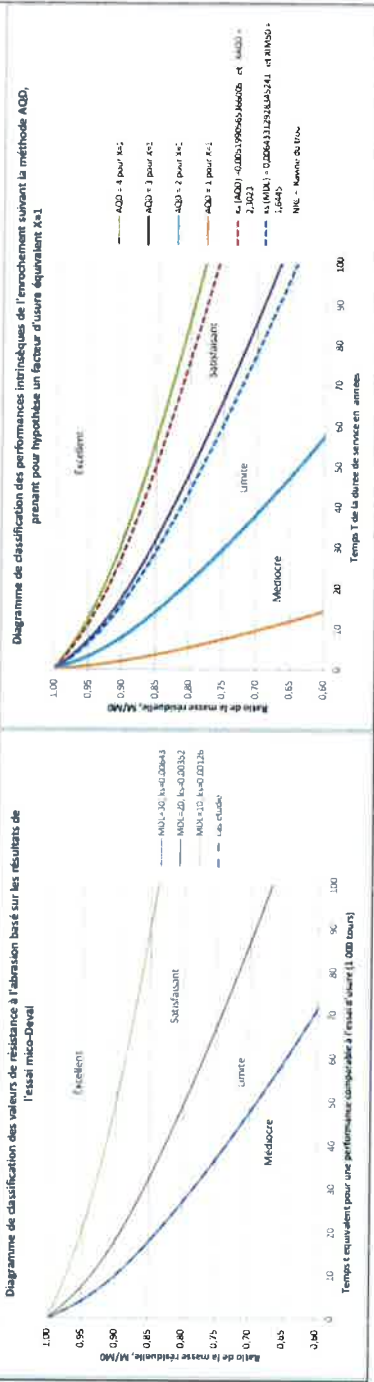


Annexe 6.9 CP 0/300 mm – F9 : modélisation pour le CP 0/300mm avec LA=35, MDE=30 et IC=80

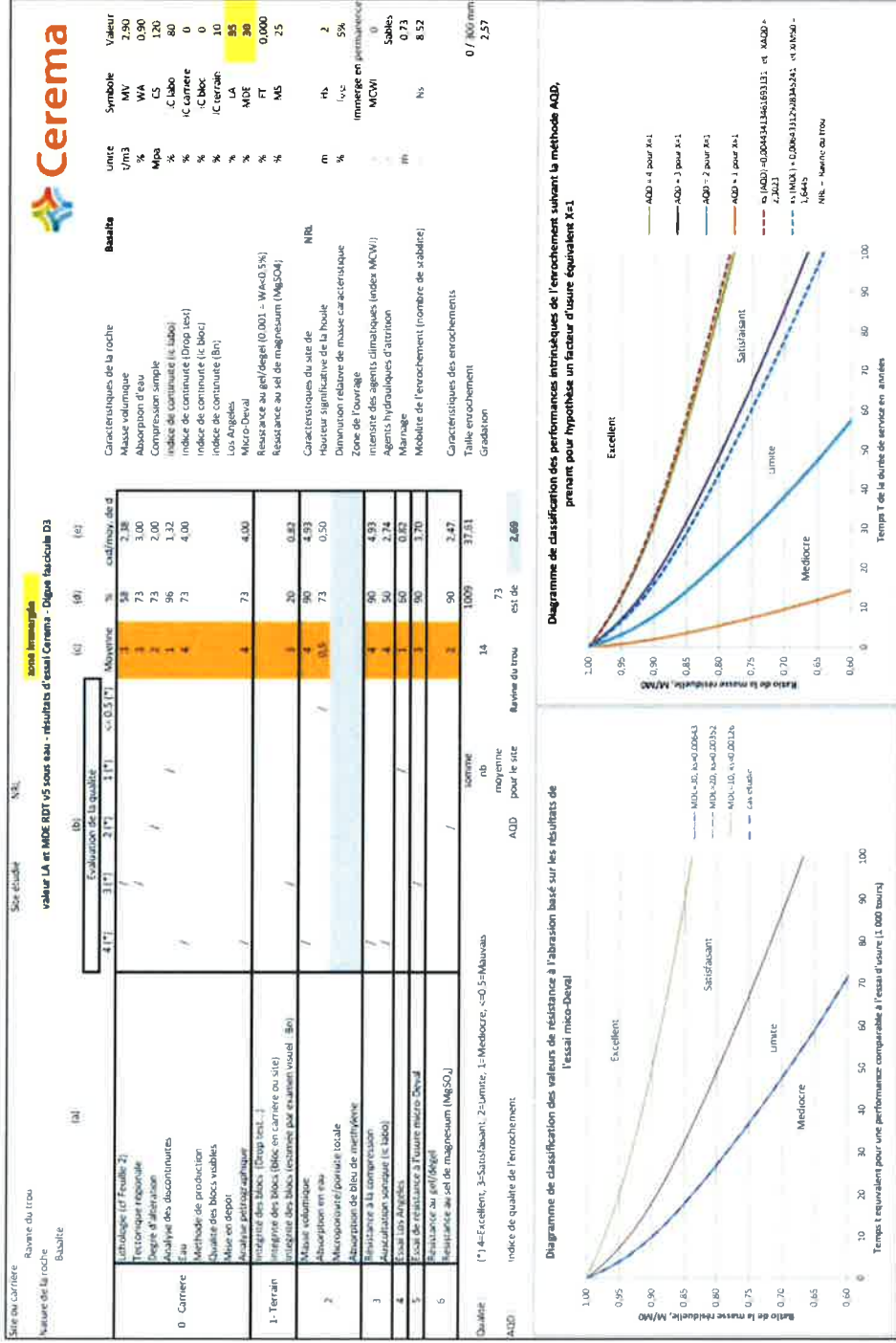
Site étudié		Matière	
Ravine du trou		Basalte	
Nature de la roche		Basalte	
0	Carrière		
1	Terrain		
2	Terrain		
3	Terrain		
4	Terrain		
5	Terrain		
6	Terrain		
Qualité		Somme des moindres pour le site	
ADD		14	
indice de qualité de l'enrochement		73	
		est. de 2,48	



Caractéristiques de la roche	Basalte	Unité	Valeur
Masse volumique		t/m ³	2,90
Absorption d'eau		%	0,90
Compression		Mpa	60
Indice de compression (Ic labo)		%	50
Indice de compression (Ic carrièr)		%	0
Indice de continuité (Ic bloc)		%	0
Indice de continuité (Ic terran)		%	30
Los Angeles		%	35
Macro-Dowal		%	58
Résistance au gel/dégel (0,001 = Wx-0,5%)		%	71
Résistance au sel de magnésium (MgSO4)		%	0,000
		%	25
Caractéristiques du site de			
Hauteur significative de la baffle		m	16
Déclivité relative de maçonnerie caractéristique		%	5%
Zone de fourrage			
Indice des agents climatiques (indice MCW)			0
Agents hydrologiques d'arrivées			
Marnage		m	0,73
Mobilité de l'enrochement (nombre de stabilité)			6,52
Caractéristiques des enrochements			
Taille enrochement		0 / 100 (mm)	2,57
Gradation			



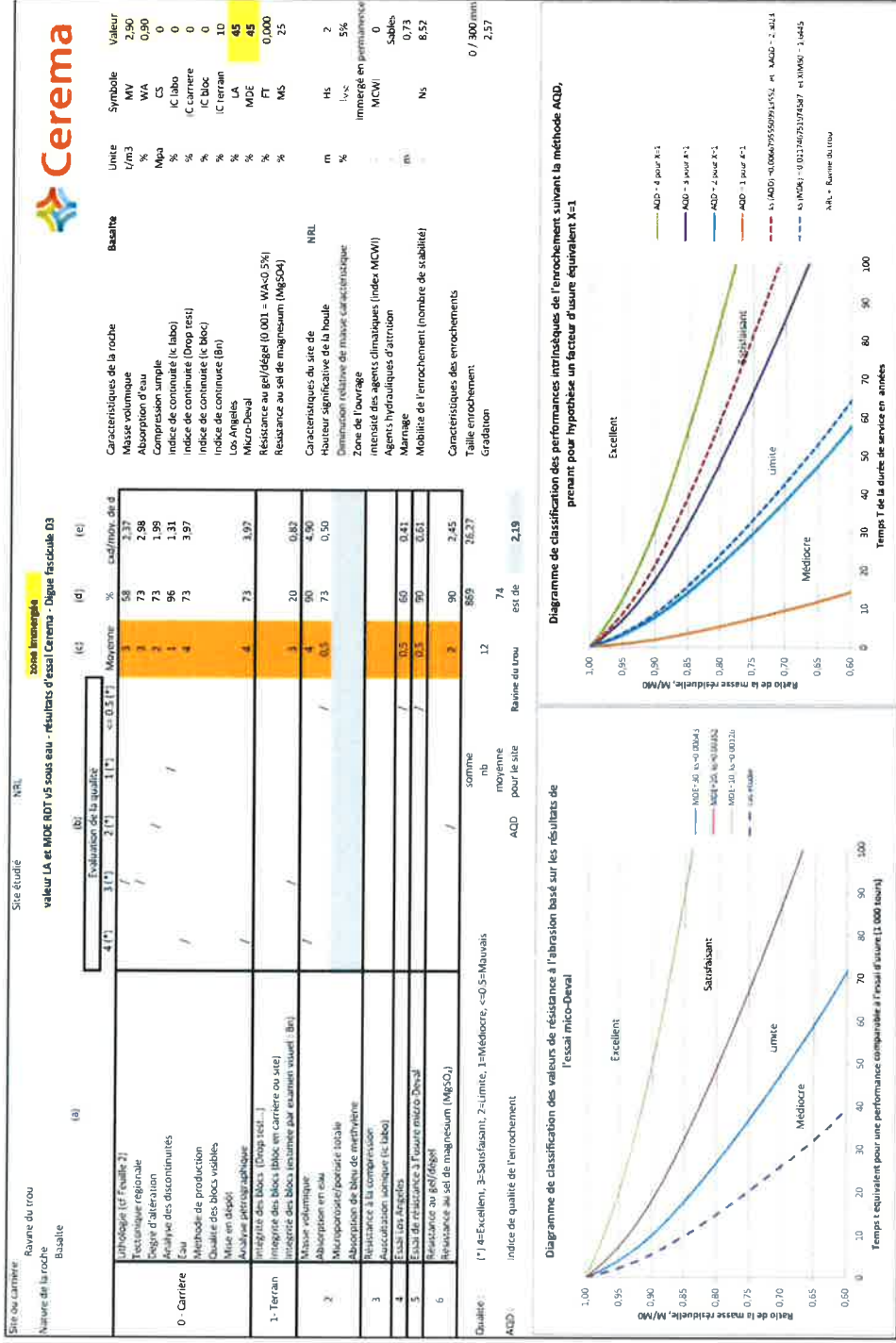
Annexe 6.10 CP 0/300 mm – F10 : modélisation pour le CP 0/300mm avec LA=35, MDE=30 Bn=30, CS=60 MPa et IC=60



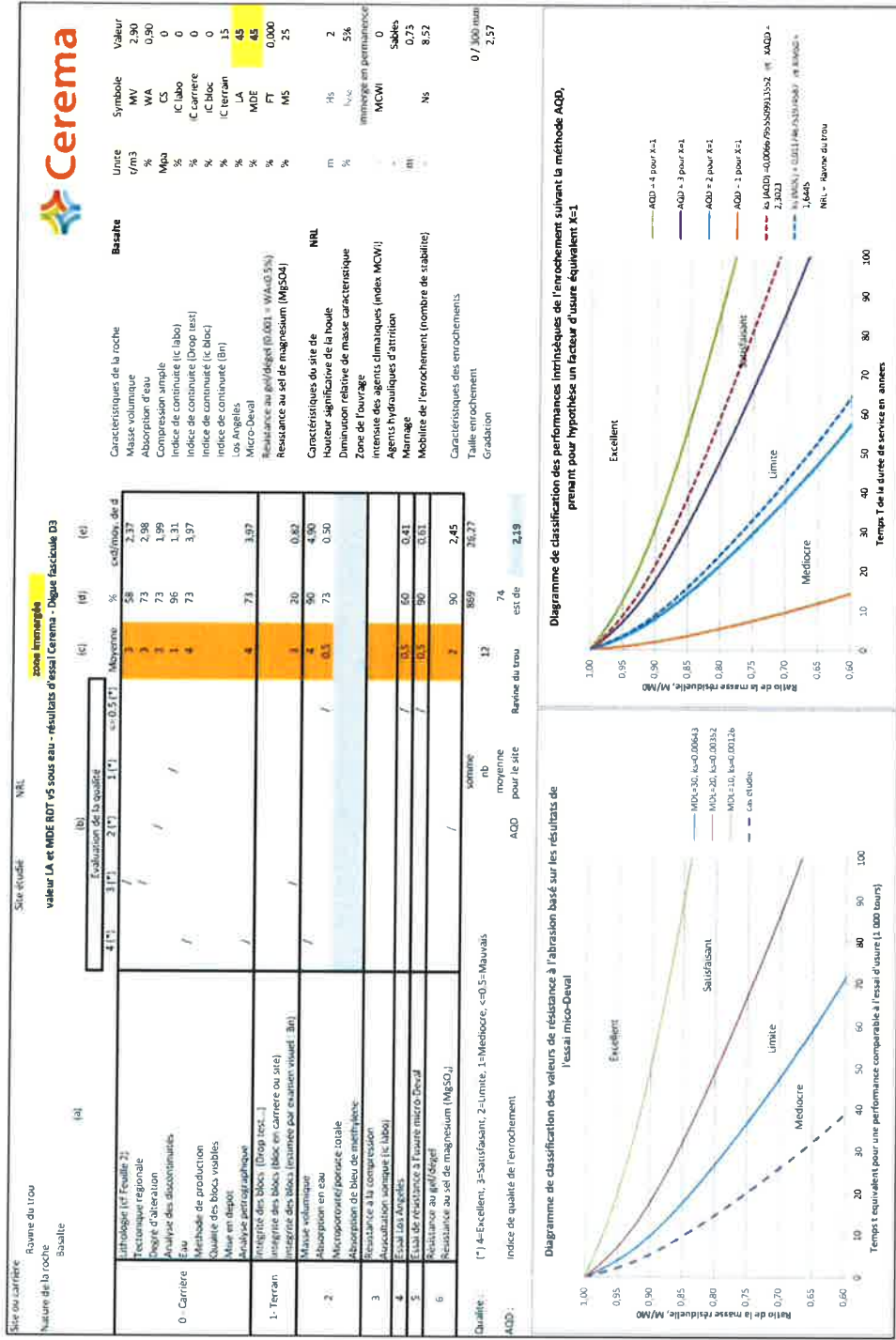
Annexe 6.11 CP 0/300 mm – F11 : modélisation pour le CP 0/300mm avec LA=35, MDE=30 Bn=10, CS=120 MPa et IC=80

ANNEXE 7

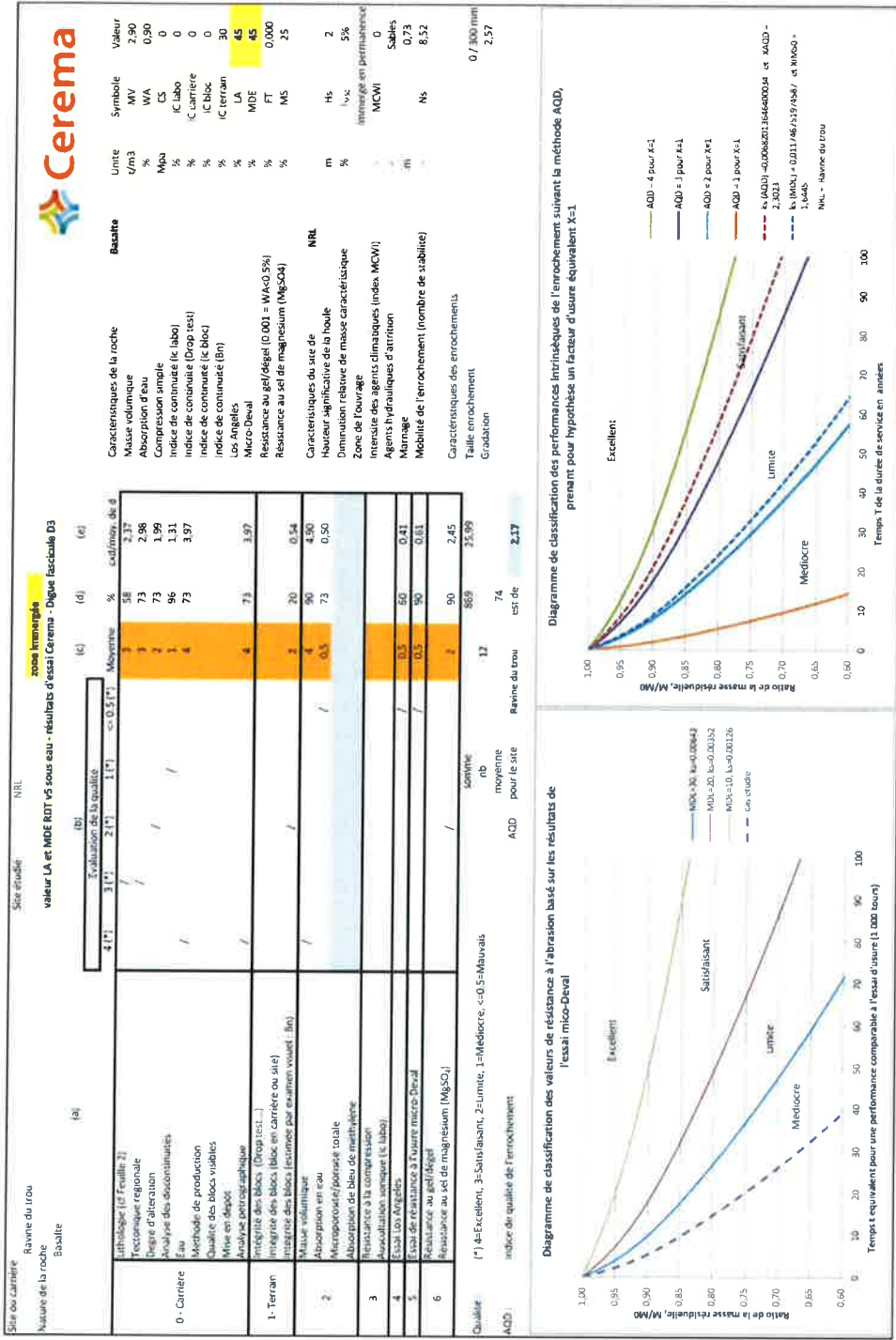
**Matériaux CP 0/300 mm cas B - LA=45
et MDE=45.**



Annexe 7.1 CP 0/300 mm – F12 : modélisation pour le CP 0/300mm avec LA=45, MDE=45 et Bn=10



Annexe 7.2 CP 0/300 mm – F13 : modélisation pour le CP 0/300mm avec LA=45, MDE=45 et Bn=15

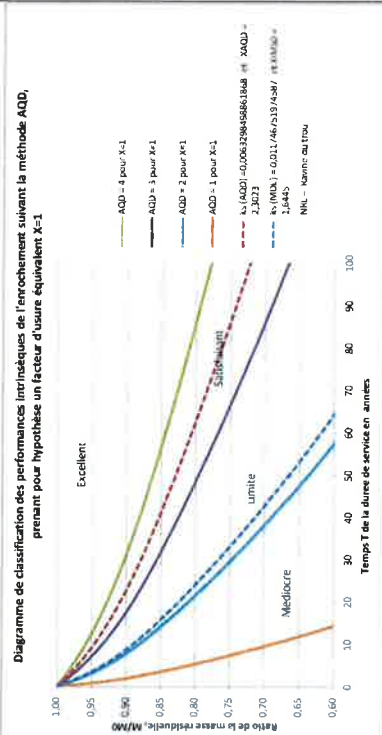
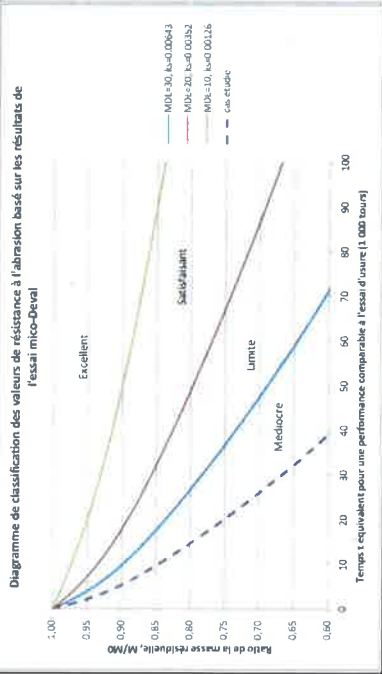


Annexe 7.3 CP 0/300 mm – F14 : modélisation pour le CP 0/300mm avec LA=45, MDE=45 et Bn=30

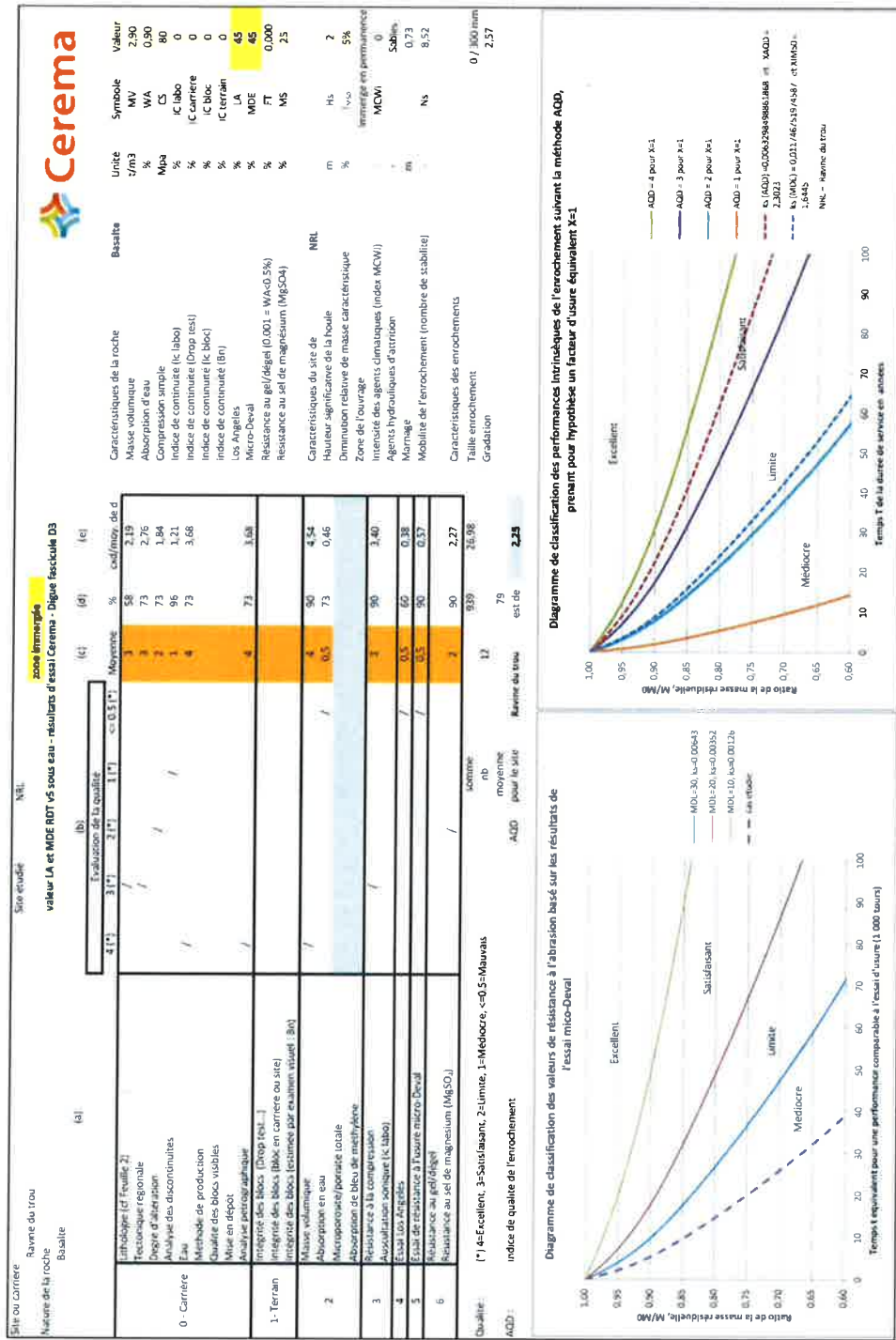
Site étudié		NRL		
Site au carrière Ravine du Trou Basalte		Zone immergée valeur LA et MDE RDT VS sous eau - résultats d'essai Cerema - Digue fascicule D3		
(a)	(b)	(c)	(d)	
Evaluation de la qualité		Moyenne		
4 (*)	3 (*)	2 (*)	1 (*)	
0 - Carrière	Lithologie (cf feuille Z1) Teneur en eau Degré d'altération Analyse des discontinuités Eau Méthode de production Qualité des blocs visibles Mise en dépôt Analyse pétrographique	3 3 3 1 4 4 4	58 73 73 96 73 73 73	2,19 2,76 1,84 1,21 3,68 3,68
1 - Terrain	Intégrité des blocs (Drop test...) Intégrité des blocs (Bloc en carrière ou site) Intégrité des blocs (examen par examen visuel - Be)	4	73	3,68
2	Masse volumique Absorption en eau Microporosité/porosité totale	4	90	4,54
3	Absorption de bleu de méthylène Résistance à la compression	0,5	73	0,46
4	Auscultation sismique (ic labo)	3	90	3,40
5	Essai de résistance à l'usure micro-Deval	0,5	60	0,38
6	Résistance au gel/dégel Résistance au sel de magnésium (MgSO ₄)	0,5	90	0,37
Qualité :	1*=Excellent, 2=Limité, 3=Satisfaisant, 4=Bon, 5=Médiocre, 6=Très médiocre	12	939	25,58
AQD :	indice de qualité de l'enrochement	12	79	2,25



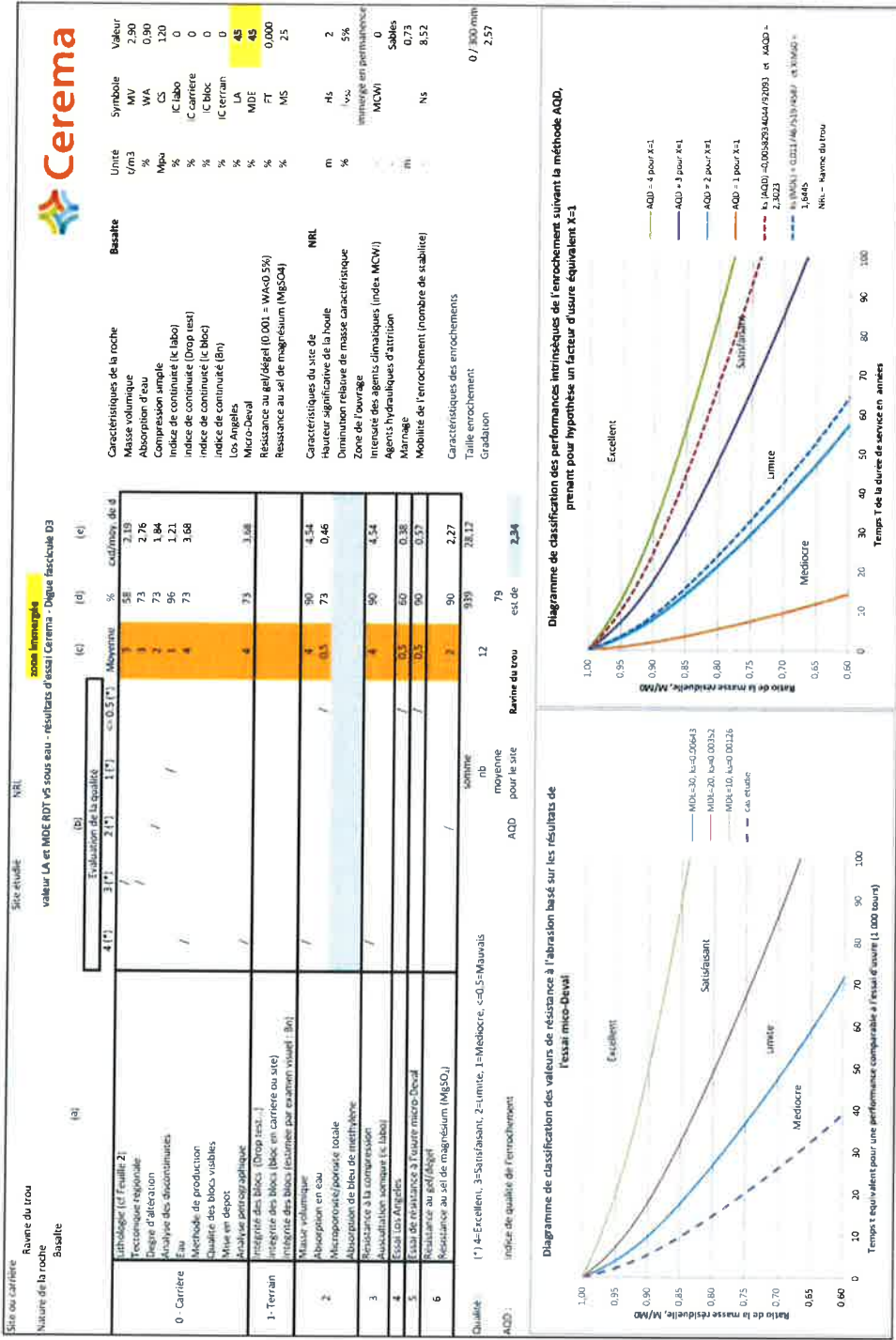
Caractéristiques de la roche	Basalte	Unité	Symbole	Valeur
Masse volumique		t/m ³	MV	2,90
Absorption d'eau		%	WA	0,90
Compression simple		Mpa	CS	60
Indice de continuité (ic labo)		%	IC labo	0
Indice de continuité (Drop test)		%	IC carrière	0
Indice de continuité (ic bloc)		%	IC bloc	0
Indice de continuité (ic terrain)		%	IC terrain	0
Los Angeles		%	LA	45
Micro-Deval		%	MDE	45
Résistance au gel/dégel (0,001 = WA < 0,5%)		%	FT	0,000
Résistance au sel de magnésium (MgSO ₄)		%	M5	25
Caractéristiques du site de	NRL			
Hauteur significative de la houle		m	Hs	2
Diminution relative de masse caractéristique		%	%	5%
Zone de l'ouvrage				
Intensité des agents climatiques (index MCWI)			MCWI	0
Agents hydrauliques d'attrition				Sabiers
Marriage		m		0,73
Mobilité de l'enrochement (nombre de stablité)			Ns	8,52
Caractéristiques des enrochements				
Taille enrochement				0 / 300 mm
Gradation				2,57



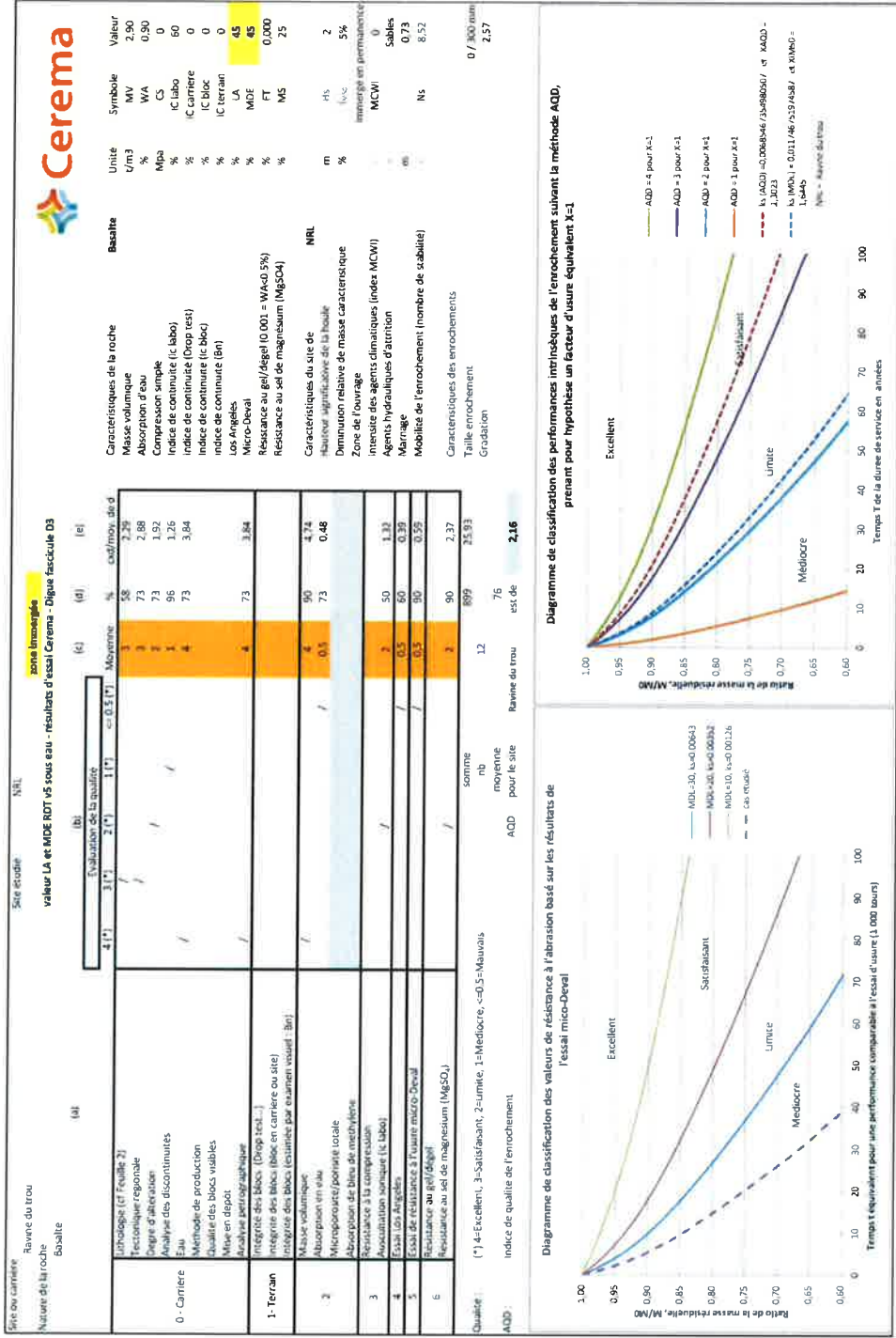
Annexe 7.4 CP 0/300 mm – F15 : modélisation pour le CP 0/300mm avec LA=45, MDE=45 et CS=60 MPa



Annexe 7.5 CP 0/300 mm – F16 : modélisation pour le CP 0/300mm avec LA=45, MDE=45 et CS=80 MPa



Annexe 7.6 CP 0/300 mm – F17 : modélisation pour le CP 0/300mm avec LA=45, MDE=45 et CS=120 MPa



Annexe 7.7 CP 0/300 mm – F18 : modélisation pour le CP 0/300mm avec LA=45, MDE=45 et IC=60

Site étudié : **NRL**

zone laminarée

valeur LA et MDE RDT VS sous eau - résultats d'essai Cerema - Digue fascicule D3

(a)	(b)	Evolution de la qualité			(c)	(d)	(e)
		1 (*)	2 (*)	1 (*)			
0 - Carrière	Litologie (cf Fouille 2) Testonique régionale Degré d'altération Analyse des discontinuités Eau Méthode de production Qualité des blocs visibles Mise en blocs Analyse pétrographique	/	/	1	58	2,28	
1 - Terrain	Intégrité des blocs (Drop test - 1) Intégrité des blocs (Bloc en carrière ou site) Intégrité des blocs (Essais par essai en volume - Bt)	/	/	2	73	2,88	
2	Masse résiduelle Absorption en eau Microporosité porosité totale Absorption de bleu de méthylène	/	/	3	73	1,92	
3	Résistance à la compression Autoclave sous vide (ic labo)	/	/	4	96	1,26	
4	Essai Los Angeles	/	/	1	73	3,84	
5	Essai de résistance à l'usure micro-Deval	/	/	4	73	3,84	
6	Résistance au gel/dégel	/	/	4	73	3,84	

Qualité : (*) 4-Excellent, 3-Satisfaisant, 2-Limite, 1-Médiocre, <0,5-Mauvais

AAD : indice de qualité de l'enrochement

seuil moyen pour le site : **2,22**



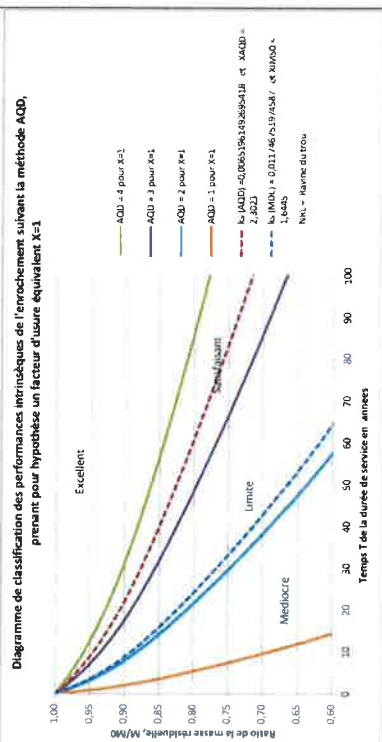
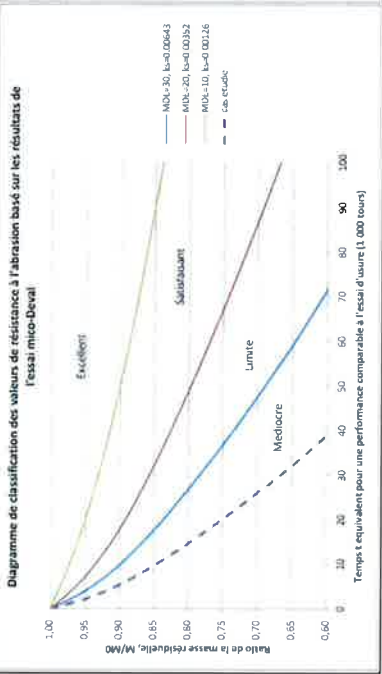
Caractéristiques de la roche	Unité	Symbole	Valeur
Masse volumique	t/m ³	MV	2,90
Absorption d'eau	%	WA	0,90
Compression simple	Mpa	CS	0
Indice de continuité (ic labo)	%	IC labo	70
Indice de continuité (Drop test)	%	IC carrière	0
Indice de continuité (ic bloc)	%	IC bloc	0
Indice de continuité (Bt)	%	IC terrain	0
Los Angeles	%	LA	45
Micro-Deval	%	MDE	45
Résistance au gel/dégel (0,001 = WA<0,5%)	%	FT	0,000
Résistance au sel de magnésium (MgSO4)	%	MS	25

Caractéristiques du site de	m	Hs	2
Hauteur significative de la houle			
Diminution relative de masse caractéristique	%	lvz	5%
Zone de l'ouvrage			
Intensité des agents climatiques (index MCWI)		MCWI	0
Agents hydrauliques d'attrition			
Matériau			Sables
Mobilité de l'enrochement (nombre de stabilisé)		Ns	8,52

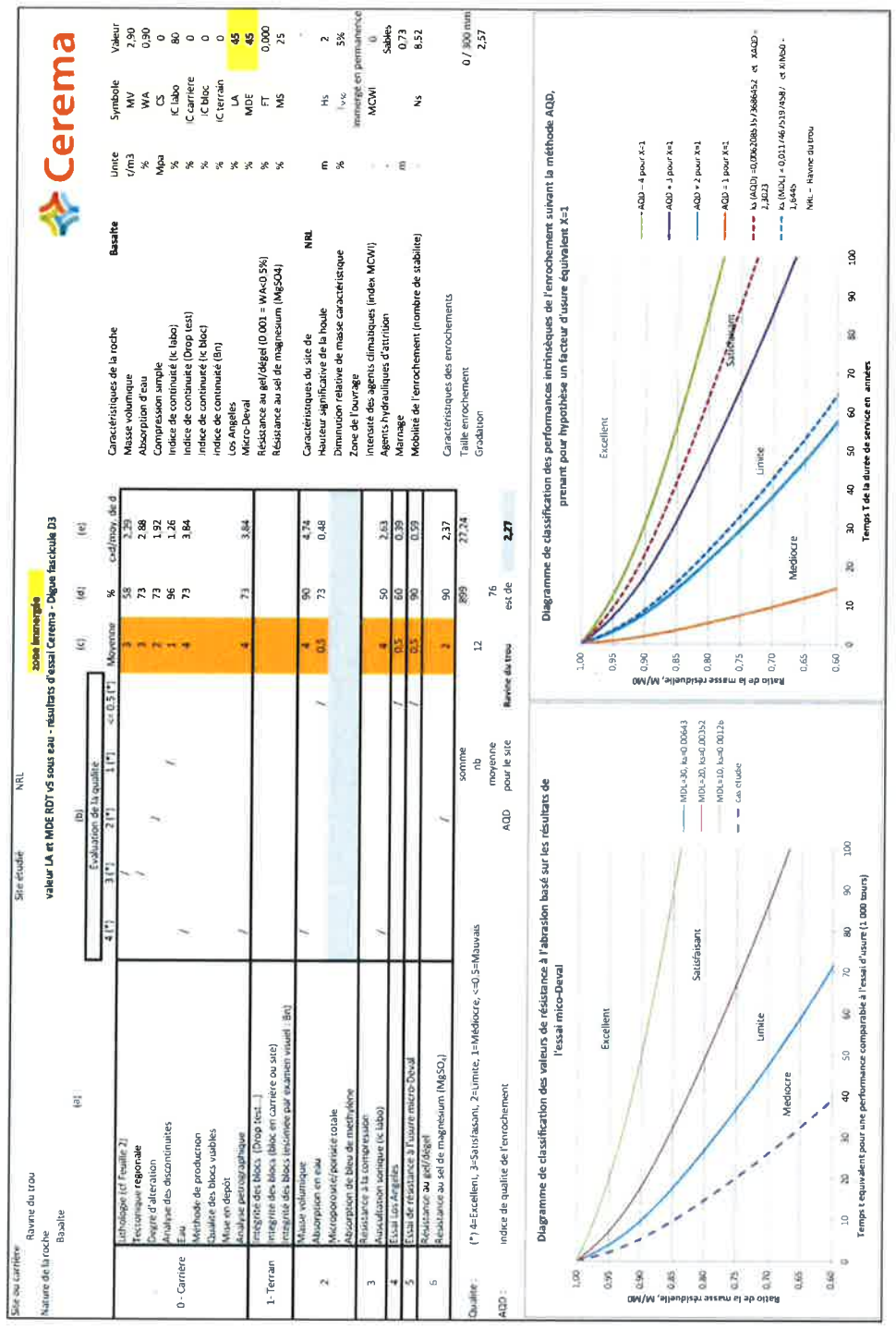
Caractéristiques des enrochements

Taille enrochement : 0 / 300 mm

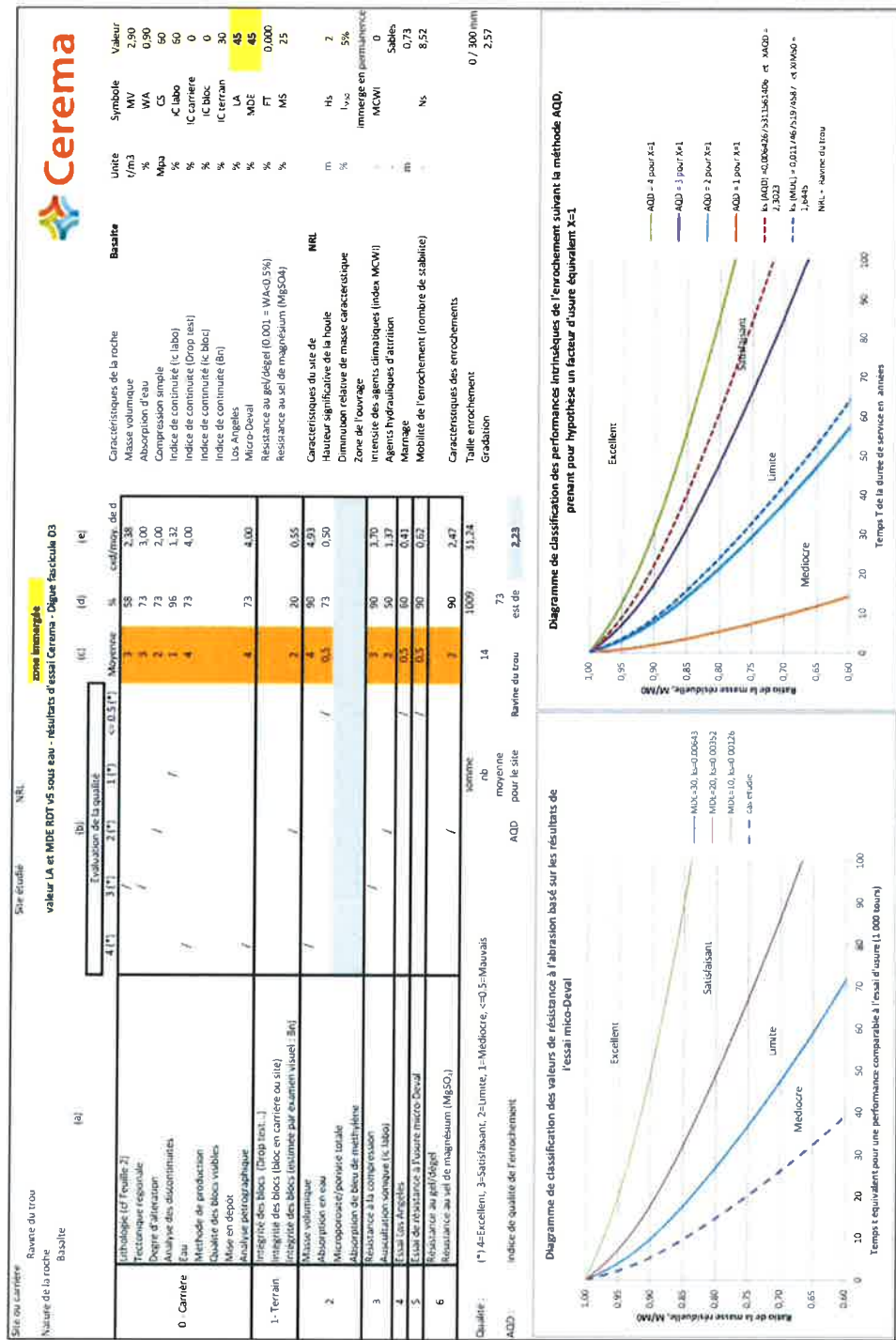
Gradation : 2,57



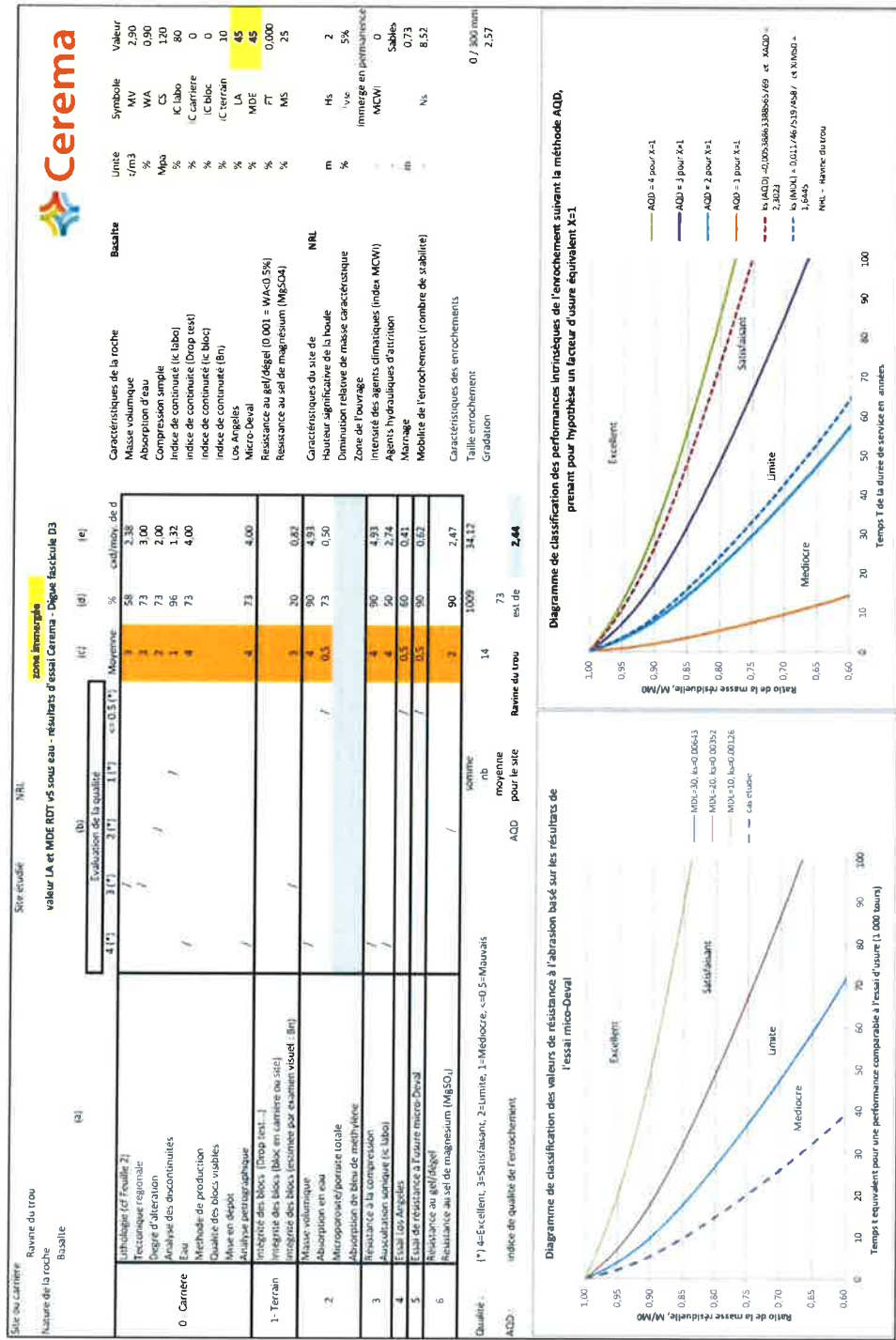
Annexe 7.8 CP 0/300 mm – F19 : modélisation pour le CP 0/300mm avec LA=45, MDE=45 et IC=70



Annexe 7.9 CP 0/300 mm – F20 : modélisation pour le CP 0/300mm avec LA=45, MDE=45 et IC=80



Annexe 7.10 CP 0/300 mm – F21 : modélisation pour le CP 0/300mm avec LA=45, MDE=45, Bn=30, CS=60 MPa et IC=60



Annexe 7.11 CP 0/300 mm – F22 : modélisation pour le CP 0/300mm avec LA=45, MDE=45, Bn=10, CS=120 MPa et IC=80

*Ce document ne peut être vendu. La reproduction totale du document est libre de droits.
En cas de reproduction partielle, l'accord préalable de l'auteur devra être demandé.
Référence : [REDACTED]*



Cerema Ouest

23 avenue de l'Amiral Chauvin – CS 20069 – 49136 Les Ponts de Cé cedex
Tel : 02 41 79 13 00 – Fax : 02 41 44 32 76 – mel : DLRCA.DTerOuest@cerema.fr

www.cerema.fr