



HAL
open science

Rhéologie des minerais : synthèse finale des études

Samir Ennour, Faouzi Hadj Hassen

► **To cite this version:**

Samir Ennour, Faouzi Hadj Hassen. Rhéologie des minerais : synthèse finale des études. [Rapport de recherche] Programme Rhéolath. Tome Nickel et Technologie, CNRT Nickel et son environnement. 2011, 65 p. ird-02160823

HAL Id: ird-02160823

<https://ird.hal.science/ird-02160823>

Submitted on 20 Jun 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

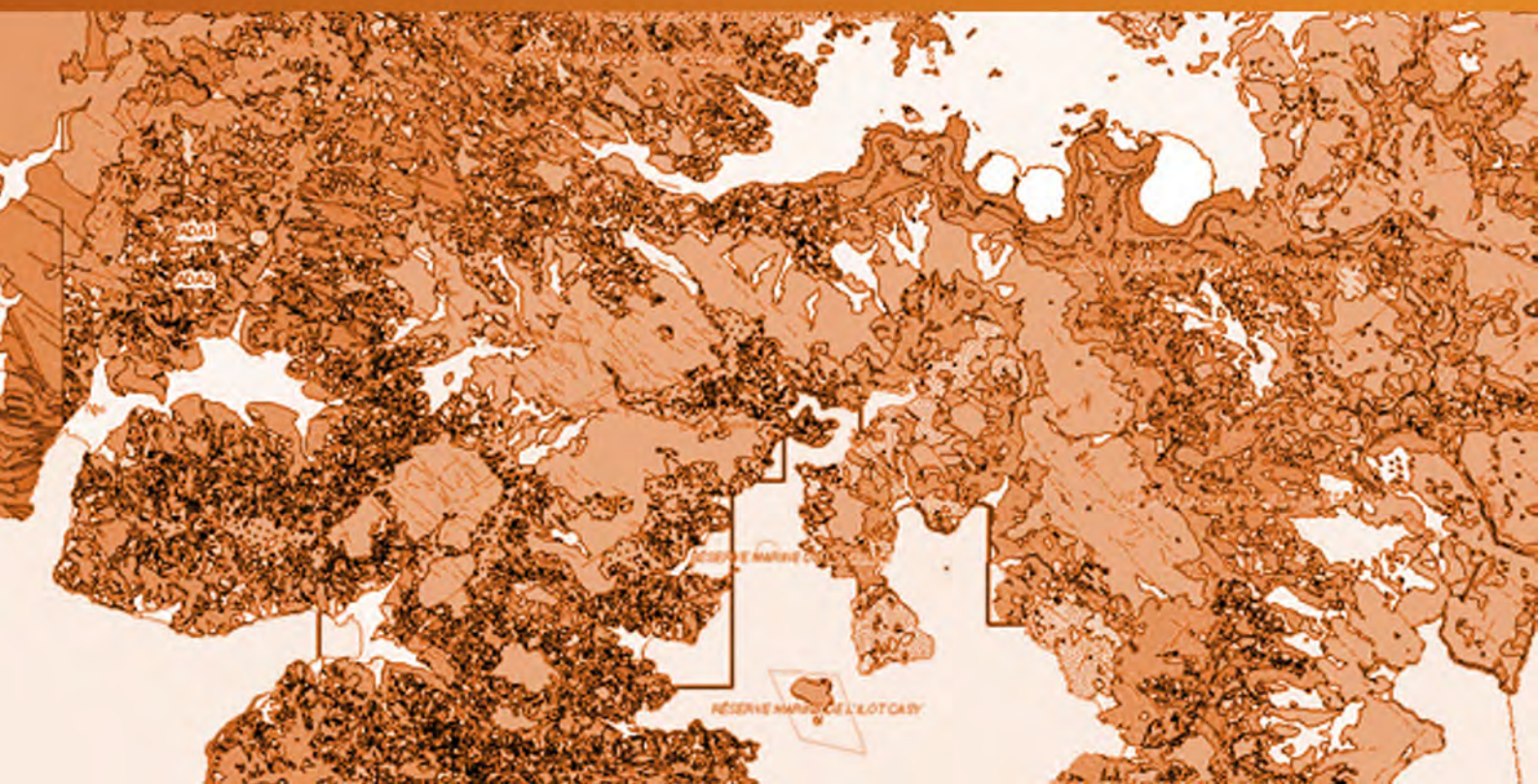
CNRT "Nickel et son environnement"

Rendu scientifique

Edition 2011

Tome Nickel et Technologie

Rhéologie des minerais



R

héologie des minerais

Etude financée par le CNRT « Nickel et son environnement

Ce programme n'a pas bénéficié de cofinancement

Programme de recherche appliquée lancé en 2009

Travaux réalisés par MECATER

En partenariat avec l'UNC, l'ENPC, LEM/LEMTA

Projet d'une durée de 19 mois

Rendu Final de 71 pages



2011

RENDU

Livrable Rhéolat

De : Samir Ennour et Faouzi Hadj
Hassen

Novembre 2011

LIVRABLE

« Synthèse finale des études »



Projet «Rhéolat»	Samir Ennour
------------------	--------------

SYNTHESE FINALE DES ETUDES

Indice	Date	Rédigé par	Vérifié par	Vérifié par
A	06/10/2011	Samir ENNOUR	Ezzeddine KHODJA	Faouzi Hadj Hassen
B	21/11/2011	Samir ENNOUR	Ezzeddine KHODJA	Faouzi Hadj Hassen
C	08/12/2011	Samir ENNOUR	Ezzeddine KHODJA	Faouzi Hadj Hassen

SOMMAIRE

1. CONTEXTE ET OBJET	1
2. DEMARCHE DE L'ETUDE	2
3. ETUDE DE LA LIQUEFACTION DES MINERAIS DE NICKEL	3
3.1. Définition du phénomène de liquéfaction et identification des facteurs prépondérants .4	
3.2. Caractérisation et Classification géotechniques des minerais	6
3.2.1. Identification des différents types de minerais.....	6
3.2.2. Caractérisation des différents types de minerais	7
3.3. Etude rhéologiques des minerais	14
3.3.1. Rhéologie des infra 63 μm	14
3.3.2. Influence de la fraction sableuse sur la rhéologie du minerai.....	16
3.3.3. Influence des vibrations sur la résistance au cisaillement des minerais.....	17
3.4. Définition des conditions de liquéfaction des minerais à partir d'essais de cisaillement cycliques réalisés en laboratoire	18
3.4.1. Evaluation du potentiel de liquéfaction des minerais saturés	19
3.4.2. Recherche de l'humidité critique produisant la liquéfaction du minerai.....	22
3.4.2.1. <i>Définition du taux de cisaillement induit par les mouvements du minéralier</i>	23
3.4.2.2. <i>Définition de la densité des minerais</i>	24
3.4.2.3. <i>Résultats des essais cycliques</i>	25
3.4.2.4. <i>Influence du taux de cisaillement cyclique</i>	27
3.4.2.5. <i>Analyse des valeurs des humidités critiques pour les différents minerais étudiés</i>	27
3.4.2.6. <i>Analyse de la cohérence entre les résultats des essais cycliques et les résultats des essais à la table à secousses</i>	28
3.4.2.7. <i>Analyse de l'influence des grenus sur la liquéfaction</i>	29
3.4.2.8. <i>Sensibilité des minerais à l'humidification</i>	32
3.4.2.9. <i>Critère de transportabilité des minerais de nickel</i>	32
3.5. Conclusion	33
4. ELABORATION D'UN ESSAI DE CONTROLE	34

4.1.	Evaluation de l'essai de la table vibrante à pointe	35
4.2.	Mise au point du protocole de l'essai	36
4.3.	Vérification du nouveau protocole sur les minerais fins	37
4.4.	Vérification de la validité du nouveau protocole pour l'ensemble des minerais	40
4.5.	Vérification de la répétabilité de l'essai TVP selon le nouveau protocole	43
4.6.	Analyse de l'influence des grenus sur la liquéfaction à partir des essais TVP modifiée. 44	
4.6.1.	Influence du pourcentage des grenus	44
4.6.2.	Influence de la taille des grenus	47
4.6.3.	Prise en compte de la fraction supra 30 mm dans l'essai TVP.....	48
5.	EVALUATION DE LA MARGE DE SECURITE	48
5.1.	Le prélèvement et la préparation des échantillons	48
5.2.	La réalisation des essais TVP	49
5.2.1.	Aléa relatif à la sollicitation induite par la houle	49
5.2.2.	Aléa relatif à l'interprétation des essais cycliques.....	50
5.2.3.	Aléa relatif au calage de l'essai TVP sur l'essai cyclique	50
5.2.4.	Aléa relatif à la procédure de l'essai TVP.....	51
5.3.	Procédure de stockage et de chargement du minerai	51
5.3.1.	La phase de mise en stock	52
5.3.2.	La phase de chargement.....	52
5.4.	Analyse qualitative de l'effet d'échelle	54
5.4.1.	La faible mobilité du minerai après sa rupture.....	54
5.4.2.	Les conditions de drainage	54
5.4.3.	Les sollicitations induites par les mouvements du minéralier.....	54
6.	CONFRONTATION DES RESULTATS DES ESSAIS TVP AU RETOUR D'EXPERIENCE	55
7.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	63
	ANNEXE	65

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Liquéfaction d'un minerai de saprolites composées de terre et de blocs et d'un minerai latéritique de Nouvelle Calédonie.....	4
Figure 2 : Minerai de type Saprolites caillouteuses.....	7
Figure 3: Corrélation entre le FMP et la limite de liquidité de la fraction fine (<0.4 mm).....	9
Figure 4 : Corrélation entre l'indice d'altération et le pourcentage des infra 2 mm.....	10
Figure 5 : Présentations des corrélations entre les différentes caractéristiques des minerais et les axes principaux	11
Figure 6: Représentation des groupes dans le plan des facteurs discriminants	11
Figure 7 : Evolution de la résistance au cisaillement (A) et de la viscosité (B) en fonction du pourcentage de la fraction volumique des grains solides infra 63 µm	15
Figure 8 : Comparaisons entre l'évolution de la viscosité avec la fraction des fines dans le cas des minerais et le modèle des sphères développé par Quemada 1977.....	16
Figure 9 : Influence de la fraction sableuse sur la rhéologie du minerai.....	17
Figure 10 : Influence des vibrations sur la rhéologie des minerais (cas du SMC3).....	17
Figure 11 : Dispositifs des essais de cisaillement triaxial cyclique	18
Figure 12 : Courbes effort/déformation en cisaillement consolidé non drainée avec mesure des pressions interstitielles (minerais latérites L1, blends B2, Saprolites SPC4 et SL1).....	19
Figure 13: Evolution de la cohésion non drainée en fonction de la contrainte de consolidation	20
Figure 14: Courbes d'évolution des pressions interstitielles et des déformations au cours de l'essai cyclique (latérites L4, consolidation sous 65 KPa, ratio de cisaillement 0.1)	21
Figure 15: Courbes de liquéfaction des minerais L4 (groupe I) et SPC4 (groupe II).....	22
Figure 16: Répartition des contraintes de cisaillement dans une cale pour un angle de gîte de 15°.....	23
Figure 17 : Cohésion nécessaire à la stabilité de la cargaison en fonction de l'angle de gîte	24
Figure 18: Superposition des courbes de saturation avec la courbe de compactage	25
Figure 19 : Photos des éprouvettes des minerais après liquéfaction sous cisaillement cyclique.....	26
Figure 20: Cohérence entre les valeurs de l'humidité critique obtenues par essais cycliques et par essais à la table à secousses	29
Figure 21: Influence des grenus sur la résistance au cisaillement cyclique des fines (essais cycliques).....	30
Figure 22: Corrélation entre la limite de liquidité et l'humidité critique des fines.....	31
Figure 23: Similitude entre l'essai TVP et le pénétromètre à cône	33
Figure 24: Essais à la table vibrante à pointe sans modifications	35
Figure 25 : Enfoncement de la pointe en fonction de l'humidité totale du minerai.....	36
Figure 26: Evolution de la valeur de la pénétration de la pointe en fonction de l'humidité totale du minerai (latérites de Poro L1).....	37
Figure 27: Evolution de la pénétration de la pointe en fonction de l'humidité totale du minerai (Saprolites de laverie MB SL2)	38
Figure 28: Pénétration de la pointe en fonction du temps pour différentes humidités	39
Figure 29: Evolution de la pénétration de la pointe en fonction de l'humidité totale du minerai (SPC2)....	42
Figure 30: Evolution de la pénétration de la pointe en fonction de l'humidité totale du minerai (SMC1)....	42
Figure 31: Evolution de la pénétration de la pointe en fonction de l'humidité totale du minerai (SMC4)....	43
Figure 32: Humidité globale du minerai au moment de la liquéfaction en fonction du pourcentage des grenus (essais TVP modifiée)	45
Figure 33: Humidité des fines au moment de la liquéfaction en fonction du pourcentage des grenus (minerai SMC4 essais TVP)	46
Figure 34 : Historique de transport des minerais de la mine de Tontouta (Vulcan STC4)	62

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Identification des prélèvements réalisés sur les 7 types de minerais	8
Tableau 2 : Caractérisation des différents prélèvements de minerais.....	9
Tableau 3: Caractéristiques moyennes des différents groupes des minerais (la valeur entre parenthèses représente l'écart type)	13
Tableau 4 : Correspondance entre la limite de liquidité et le la teneur en eau limite correspondant au changement d'état (liquide-plastique).....	15
Tableau 5 : Caractéristiques mécaniques intrinsèques des minerais des groupes 1 et 2.....	20
Tableau 6 : Taux de cisaillement pour trois gîtes à différentes profondeurs	23
Tableau 7: Valeurs des couples densité/ humidité optimale pour les minerais des groupes 1 et 2	24
Tableau 8 : Valeurs des couples densités/ humidité optimale pour les minerais du groupe 3	25
Tableau 9 : Humidité et degrés de saturation des différents échantillons de minerai correspondant à la liquéfaction.	26
Tableau 10: Sensibilité de la valeur de l'humidité critique du minerai aux taux de cisaillement cyclique ($q/2\sigma'_c$)	27
Tableau 11: Valeurs des humidités critiques correspondant aux différents minerais étudiés	28
Tableau 12: Valeurs des humidités critiques pour différents cisaillements mobilisés sous la pointe (latérites de Poro L1).....	38
Tableau 13: Comparaison entre les résultats des essais TVP modifiée et des essais de cisaillement cyclique	40
Tableau 14: Analyse de la répétabilité des essais TVP modifiée	44
Tableau 15 : Effet de la taille des grenus sur l'humidité critique	47
Tableau 16: Synthèse de l'analyse des aléas relatifs à la réalisation de l'essai TVP	53
Tableau 17 : Analyse comparative des résultats des essais TVP avec les TML statistiques et le retour d'expérience.....	57
Tableau 18 : Résultats des essais TVP réalisés sur des échantillons de minerais de nickel prélevés dans des cargaisons transportées dans des conditions normales de sécurité ; compagne d'essais du mois d'octobre 2011	60

1. CONTEXTE ET OBJET

Les minerais de nickel de Nouvelle Calédonie sont exploités en mines à ciel ouvert et sont transportés par voie maritime vers les usines de traitement situées à Nouméa, en Chine, au Japon, en Australie, en Corée,

La structure minéralogique des minerais et les processus d'altération qui les ont affectés font que ces minerais contiennent naturellement une grande quantité d'eau, leur humidité varie de 20 à 28 % pour les minerais caillouteux et de 28 à 35 % pour les minerais terreux, mais peut atteindre jusqu'à 40 % pour certains minerais terreux et argileux.

Avant leur chargement dans les minéraliers, les minerais sont stockés sous forme de tas sur des plateformes aménagées en bord de mer. Lorsque les tas ne sont pas couverts, l'humidité du minerai peut augmenter à cause des infiltrations des eaux de pluie.

Quand leur humidité dépasse un certain seuil, les minerais peuvent se liquéfier au cours du transport sous l'effet des mouvements cycliques induits par la houle. La liquéfaction du minerai dans les cales « phénomène appelé "carène liquide" » peut déséquilibrer le minéralier et provoquer son chavirage notamment en conditions extrêmes de houle.

Les essais de contrôle de transportabilité proposés par l'IMO (recueil du BC Code) ne sont pas adaptés aux minerais de nickel qui se caractérisent par une forte hétérogénéité et qui se composent d'un mélange de terre (latérites ou saprolites terreuses), parfois argileuse et de blocs pouvant atteindre 200 mm de diamètre (saprolites rocheuses).

Afin de garantir la sécurité du transport maritime des minerais, en concertation avec la DIMENC (Nouvelle Calédonie et la DGPR ministère du transport et du développement durable), le Syndicat des Entreprises Minières de Nouvelle Calédonie a lancé une étude qui consiste à élaborer un essai de contrôle de transportabilité du minerai en se basant sur des essais de liquéfaction en laboratoire et sur une analyse de la rhéologie de la fraction fine du minerai. Cet essai de contrôle doit s'appliquer pour les différents types de minerais.

Cette étude a été réalisée par le groupement *MECATER/CERMES/UNC/LEM/LEMTA* sous tutelle du CNRT Nouvelle Calédonie. MECATER a été chargée de l'élaboration de l'essai de contrôle de la synthèse des études.

Nous présentons dans ce premier volet, la synthèse des études qui ont permis d'élaborer l'essai de contrôle.

Le deuxième volet qui comporte le protocole de prélèvement et d'exécution de l'essai de contrôle avant le chargement du minerai sera présenté dans un rapport séparé.

2. DÉMARCHE DE L'ÉTUDE

L'étude a été réalisée en deux étapes :

Etape 1 : Etude de la liquéfaction des minerais de nickel en laboratoire.

Compte tenu de la forte hétérogénéité du minerai de nickel et dans le but de couvrir toute sa variabilité, nous avons procédé à une caractérisation géotechnique des différents types de minerais puis nous avons réalisé une classification de ces minerais vis-à-vis de leur prédisposition à la liquéfaction. Ainsi les minerais ont été répartis en trois groupes : les latérites, les saprolites terreuses et les saprolites composées de mélange de terre et de blocs. Pour ce dernier groupe, la liquéfaction se fait dans les fines (infra 2 mm), les grenus auraient plutôt un rôle stabilisateur (*MECATER/CERMES/UNC*).

Nous avons par la suite réalisé une étude de la rhéologie de la fraction fine des minerais représentatifs des trois groupes (*UNC/LEM/LEMTA*). Cette étude a permis de comprendre la fluidité des minerais en fonction de leur humidité et de mettre en évidence la modification du comportement des minerais sous effet des vibrations.

En parallèle avec l'étude rhéologique, des essais de cisaillement cycliques en laboratoire ont été réalisés dans le but de définir les conditions de liquéfaction des différents minerais après leur consolidation dans les cales. Pour tenir compte de l'effet des grenus, des cellules de cisaillement de gros diamètre (300 mm) ont été utilisées. Les contraintes imposées au cours des essais ont été déduites à partir d'une analyse théorique de l'état des contraintes dans les cales du minéralier (calcul aux éléments finis). Cette étude a permis de définir les facteurs prépondérants dans la liquéfaction notamment le rôle des grenus et la plasticité des fines, et de définir l'humidité critique (seuil de liquéfaction) spécifique à chacun des échantillons des minerais étudiés.

Etape 2 : Elaboration d'un essai de contrôle de transportabilité

Etant donné la grande hétérogénéité des minerais, notamment le groupe minerai composé de terre et de blocs, il n'est pas possible de définir une humidité critique qui s'applique pour chaque type de minerai. Il est donc nécessaire de réaliser un essai de contrôle avant le chargement du minerai.

Pour définir l'essai de contrôle, nous nous sommes intéressés à l'essai à la table vibrante à pointe « TVP » proposé dans le recueil du BC Code. Notre choix a été motivé par la taille de l'éprouvette (200 mm de diamètre) qui permet d'intégrer des cailloux de 30 mm, et par le poinçonnement sous la pointe associé à des vibrations verticales qui permet de simuler un cisaillement cyclique.

Après plusieurs essais de vérification, nous avons retenu l'essai TVP et nous avons procédé à des modifications sur la pointe en se calant par rapport aux résultats des essais cycliques réalisés dans la première étape de l'étude.

Afin de vérifier sa robustesse, cet essai a été testé avec succès sur plus de 15 échantillons de minerais différents et a permis de confirmer le rôle stabilisateur des grenus et d'évaluer l'effet de la taille des grenus sur la liquéfaction.

Enfin et dans le but d'évaluer la marge de sécurité que peut offrir cet essai de contrôle par rapport à la liquéfaction et à la stabilité du minerai au cours du transport, nous avons réalisé une analyse comprenant trois axes : la définition des aléas qui sont couverts par l'essai, la validation des résultats de l'essai par le retour d'expérience, et l'analyse de l'effet d'échelle (passage de l'éprouvette à la dimension de la cale) à partir d'une modélisation numérique.

3. ETUDE DE LA LIQUÉFACTION DES MINERAIS DE NICKEL

L'instabilité d'une cargaison de minerai peut provoquer une gîte importante d'un minéralier et peut, dans certaines conditions extrêmes, entraîner son échouage.

L'instabilité de la cargaison peut se manifester par les deux phénomènes suivants :

- Le premier est un ripage de la cargaison qui résulte d'une déformation irréversible de la surface du minerai, sous l'effet du roulis. Pour les minerais de forte humidité, lorsque l'inclinaison dépasse une certaine limite (15 à 20°), le cisaillement rapide induit à la surface du minerai dépasse la cohésion non drainée du minerai (15 à 30 KPa) et provoque la rupture de la structure du minerai. Dans le cas où les déformations de la surface sont importantes, le centre de gravité de la cargaison se déplace et provoque une gîte.
- Le deuxième résulte d'une liquéfaction du minerai sous l'effet des cisaillements cycliques induits par les mouvements du navire. La liquéfaction transforme le minerai en un état fluide ou semi fluide visqueux de très faible cohésion (<2 KPa). Dans ce cas, le centre de gravité de la cargaison n'est plus fixe et se déplace avec les mouvements du bateau.

Dans la pratique, ces deux phénomènes sont combinés, lorsque les minerais sont humides, les mouvements du minéralier induisent dans les minerais des cisaillements cycliques de faibles amplitudes (inférieurs à la valeur de la cohésion non drainée) qui ne provoquent pas la rupture immédiatement, mais la répétition des cisaillements peut conduire à une augmentation progressive des pressions interstitielles et par conséquent à une réduction de la résistance au cisaillement. Lorsque la résistance au cisaillement (ou

cohésion non drainée) descend sous la résistance requise (exemple : 13 KPa pour 15° de gîte), la surface du minerai commence à se déformer de façon irréversible.

Ainsi pour garantir la stabilité du minerai, il faut que la cohésion non drainée soit supérieure à la plus forte valeur du cisaillement induit par le roulis.

D'après le BC Code, les minerais de nickel sont classés parmi les cargaisons à fort potentiel de liquéfaction (groupe A dans le recueil BC Code).



Figure 1 : Liquéfaction d'un minerai de saprolites composées de terre et de blocs et d'un minerai latéritique de Nouvelle Calédonie

3.1. Définition du phénomène de liquéfaction et identification des facteurs prépondérants (CF. *Synthèse bibliographique réf: Mecater/CNRT NICKEL/04/SE/A/2010*)

D'une façon générale, on dénomme liquéfaction le processus de transformation d'une substance solide à un liquide. Pour un sol saturé, la transformation à l'état liquide se fait par augmentation de la pression interstitielle qui peut résulter soit d'un chargement quasi-statique monotone, soit d'un chargement cyclique. Elle a pour conséquence une diminution des contraintes effectives et donc une réduction de la résistance au cisaillement qui, à l'état ultime, peut devenir nulle. Ce phénomène peut se produire de la même façon pour les sols non saturés ($S_r > 85\%$), dans ce cas la pression d'air interstitielle contribue à la rupture.

La liquéfaction des matériaux concerne leur comportement à la rupture et son étude est souvent associée au comportement sous chargement cyclique. Chaque cycle réduit la contrainte effective (moyenne) par suite de l'augmentation de la pression interstitielle. Ce processus s'accélère lorsque la contrainte effective descend sous le seuil caractéristique

(contrainte correspondant à une variation volumique nulle). Après quelques cycles, la contrainte effective tend à s'annuler lors d'une décharge et il y a alors liquéfaction.

La liquéfaction des sols est souvent étudiée à partir d'essais de cisaillement cyclique en laboratoire.

Les facteurs prédominants dans la liquéfaction des minerais au cours du transport maritime sont les suivants :

L'état de contrainte : La résistance au cisaillement cyclique RCC est pratiquement proportionnelle à la contrainte effective verticale. Pour une même valeur de cisaillement cyclique, la liquéfaction se produit plutôt dans les sols situés à faible profondeur.

La densité : La densité du matériau constitue le premier paramètre dont l'influence a été reconnue. La RCC d'un matériau est pratiquement proportionnelle à sa densité relative jusqu'à des valeurs de 70 à 80 %. Au-delà de ces valeurs, l'augmentation est beaucoup plus rapide.

La granulométrie : La RCC est très liée à la granulométrie. Les sols, les plus sensibles à la liquéfaction sont les sables fins (<1.5 mm) à granulométrie uniforme. Finn en 1981 et Bouferra-Shahrour en 2001 ont montré que les ultra fines (< 2 μm) affectent d'une manière importante le comportement dynamique des sols, l'augmentation de la fraction d'argile jusqu'à 15% réduit d'une manière sensible la résistance à la liquéfaction des sols. Par contre lorsque la proportion d'argile devient dominante, le sol devient moins sensible à la liquéfaction.

La structure, qui désigne la forme des grains et leur arrangement, présente un effet significatif sur la RCC. Il est admis que les sols à grains anguleux sont moins sensibles à la liquéfaction.

La saturation : Dans un échantillon parfaitement saturé et en condition non drainée, la variation de volume total est nulle. L'eau interstitielle étant nettement moins compressible que le squelette, la tendance à la variation de volume est entièrement contrebalancée par l'augmentation de la pression de l'eau. Dans un échantillon partiellement saturé, la variation de volume est possible par compression de l'air occlus. Il en résulte une augmentation plus faible de la pression interstitielle, et donc, en conditions non drainées, une RCC plus élevée.

Le pourcentage de la fraction grossière : Les matériaux grossiers sont des matériaux qui comportent un sol fin appelé matrice (sable, limon, argile) et un mélange de gros éléments appelés inclusions (cailloux, graviers, ...). Les essais de laboratoire ont permis de mettre en évidence une tendance claire d'augmentation de la résistance au cisaillement du matériau avec l'augmentation de la taille des grossiers qui le constituent. De la même façon, l'augmentation de la proportion des grossiers provoque un accroissement de la

résistance au cisaillement. En effet, pour chaque diamètre spécifique de grossiers, il existe une proportion au-delà de laquelle les particules grossières se mettent en contact et forment une nouvelle structure avec de nouvelles caractéristiques qui sont proches des caractéristiques du matériau grossier propre. Les particules fines dans ce cas occupent les interstices entre les grossiers et jouent le rôle de lubrifiants.

En se basant sur les règles parasismiques, nous considérons que :

- La fraction granulométrique la plus vulnérable à la liquéfaction est constituée de sables fins (0.05 – 1.5 mm). Les matériaux contenant plus de 50 % de sables fins auraient un fort potentiel de liquéfaction
- La fraction grenue >2 mm, n'est pas sujette à la liquéfaction. Les minerais contenant moins de 10 % d'éléments fins <2 mm ne seraient pas liquéfiables.
- Les silts et les argiles très plastiques, améliorent la résistance à la liquéfaction lorsqu'ils sont dans le minerai avec des proportions supérieures à 20%.

3.2. Caractérisation et Classification géotechniques des minerais (Réf : Mecater CNRT NICKEL/40/EK/C/2010)

Dans cette partie de l'étude, nous avons caractérisé les différents types de minerai à partir de plusieurs prélèvements, ensuite nous avons sélectionné des prélèvements qui représentent le mieux la variabilité des minerais en Nouvelle Calédonie. Les prélèvements sélectionnés serviront à l'étude du comportement dynamique et de la rhéologie des minerais.

3.2.1. Identification des différents types de minerais

En concertation avec les géologues des différentes sociétés minières participant au projet Rhéolat, une première classification sommaire des minerais de nickel de la Nouvelle Calédonie a été établie. Cette classification est basée sur les 3 paramètres suivants :

- Le ratio d'altération (Fe/MgO) qui permet de discrétiser 3 grands groupes : les latérites avec un fort ratio (proche de 15), les blends (mélange de latérites et de saprolites terreuses très altérées) avec un ratio proche de 5 et les minerais saprolitiques caractérisés par un très faible ratio d'altération (<1).
- La granulométrie qui permet de classer les minerais en matériaux fins (terreux) comportant une faible proportion de grenus, et les matériaux caillouteux comportant une proportion importante de grenus.

- L'existence de minéraux argileux dans les minerais saprolitiques qui permet de distinguer deux types de minerai : argileux et non argileux.

Cette classification a permis de définir 7 types de minerai. Afin de couvrir la variabilité des minerais au sein d'un même type, nous avons prélevé 3 à 4 échantillons de provenances différentes pour le même type de minerai, soit 24 échantillons au total ; CF. Tableau 1.

Nous tenons à préciser que les minerais de type saprolites caillouteuses comportent une proportion de supra 30 mm qui peut dépasser 40%. Cette proportion n'est pas considérée dans les essais de laboratoire, son effet sur la liquéfaction sera analysé indirectement.

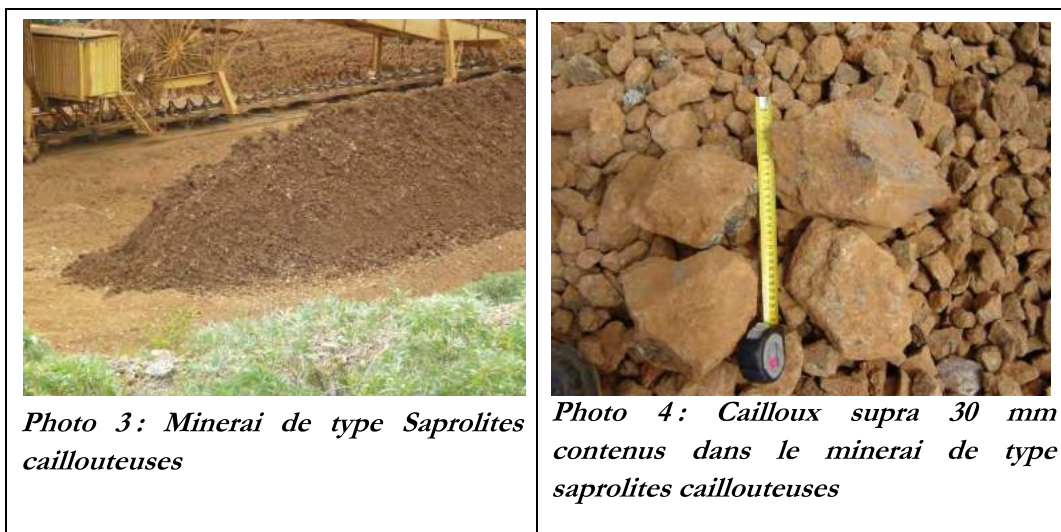


Figure 2 : Minerai de type Saprolites caillouteuses

3.2.2. Caractérisation des différents types de minerais

La première phase d'essais comportait des essais géomécaniques ainsi que des essais à la table à secousses (selon le protocole défini dans le BC code) qui donnent une valeur d'humidité critique appelée point d'affaissement (FMP). Les résultats des essais sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 1 : *Identification des prélèvements réalisés sur les 7 types de minerais*

Type de minerai	Code	Société	Site	Nature	Poids total prélevé (Kg)	Infra 30mm (%)	Indice d'altération <i>(Sur les Infra 30 mm)</i>
Latérites	L1	SLN	Poros	Latérites	50	100.0	13
	L2	SMSP	Kouaoua	Latérites	50	100.0	6.3
	L3	SMSP	nakety	Latérites	50	100.0	21.8
	L4	SMGM	Tontouta	Latérites	50	100.0	16.9
Blends	B1	SMT	Nakéty	Latérites blends	50	100.0	17.1
	B2	SMT	Monéo	Latérites blends	50	100.0	6.5
Saprolites laverie	SL1	SLN	Nepoui	Sap. (gâteaux)	50	100.0	0.7
	SL2	SLN	Tiébaghi	Sap. (gâteaux)	50	100.0	1.3
	SL3	SLN	Népoui	Sap. (g+(s+g))	250	100.0	0.6
Saprolites peu caillouteuses argileuses	SPCA1	SLN	Poum	Saprolites	460.55	94.2	2
	SPCA2	SLN	Tiébaghi	Saprolites	1038	78.8	1.2
	SPCA3	SLN	Tiébaghi	Saprolites	1238	63.8	1.5
Saprolites peu caillouteuses sans argiles	SPC1	SMT	Nakéty	Saprolites	1311	75.6	0.6
	SPC2	NMC	Kouaoua	Saprolites	1237	83.0	1.8
	SPC3	SLN	Poros	Saprolites	522	76.6	0.8
	SPC4	NMC	Ouaco	Saprolites	883	92.0	2.7
Saprolites moyennement caillouteuses	SMC1	NMC	Nakéty	Saprolites	1283	71.2	1.1
	SMC2	NMC	Ouaco	Saprolites	830	71.2	0.6
	SMC3	SLN	Kouaoua	Saprolites	1546	78.8	0.7
	SMC4	SMT	Monéo	Saprolites	734	56.7	1
Saprolites très caillouteuses	STC1	SLN	Thio	Saprolites	1244	78.1	0.6
	STC2	NMC	Poya	Saprolites	1657	79.2	1.6
	STC3	SLN	EDN	Saprolites	1181	43.9	0.5
	STC4	SMGM	Tontouta	Saprolites	1180	87.1	0.6

Tableau 2 : Caractérisation des différents prélèvements de minerais

Code	D ₁₅	D ₅₀	CU	IA	Al ₂ O ₃	VBS	IP	WL		Infra80µm	Infra2mm	FMP
L1	2	8.6	6.5	13.0	3.4	0.1	16.0	77.0	38.5	92.0	99.8	37.7
L2	2.8	8.4	10.0	6.3	4.6	0.2	11.0	70.0	27.9	78.7	89.4	32.9
L3	2.2	12.6	6.5	21.8	5.2	2.0	14.0	64.0	37	89.9	97.3	32.4
L4	2.4	15.2	12.0	16.9	3.3	0.3	14.0	76.0	28.1	81.9	90.6	36
B1	2	13.1	10.0	17.1	3.7	0.2	6.0	68.0	32	87.5	93.7	33.6
B2	2.4	17	12.5	6.5	3.8	0.7	15.0	66.0	26.3	86.8	93.9	31.9
SL1	3.4	15.7	9.3	0.7	1.2	5.0	24.0	67.0	21.9	83.6	99.8	35.3
SL2	3.8	19	7.0	1.3	4.5	7.8	51.0	105.0	20.45	93.8	99.2	37.9
SL3	2000	5300	4.1	0.6	3.7	0.1	5.0	30.0	1.33	4.4	14.7	Non
SPCA1	9.5	55.0	30.0	2.0	3.3	7.1	48.0	106.0	8.1	55.6	69.8	42.9
SPCA2	12.5	2550	1	1.2	4.2	8.4	61.0	115.0	7.13	33.8	48.1	40
SPCA3	23	13500	1	1.5	5.3	5.9	20.0	70.0	4.26	24.5	32.4	34.2
SPC1	31	8100	875.0	0.6	3.5	1.0	14.0	62.0	4.09	20.0	31.9	27.8
SPC2	6.4	4900	2	1.8	0.8	0.7	16.0	65.0	12.57	34.2	44.6	31.6
SPC3	22	7400	1	0.8	3.2	1.2	18.0	68.0	4.44	21.3	34.9	29.4
SPC4	6.6	480.0	225.6	2.7	1.2	6.6	34.0	103.0	12.4	40.6	75.3	44.3
SMC1	14	6400	1	1.1	1.2	3.1	24.0	73.0	6.56	24.8	39.2	34.4
SMC2	13	8000	2	0.6	1.2	0.4	22.0	62.0	7.51	21.9	35.5	27.5
SMC3	16	5900	1	0.7	1.2	0.6	11.0	67.0	6.31	25.6	40.5	31.5
SMC4	14	15500	2	1.0	1.5	1.4	19.0	57.0	7.45	22.1	30.4	25.3
STC1	18	6900	1	0.6	0.8	0.7	7.0	54.0	6.17	21.5	36.7	26.9
STC2	12	6600	1	1.6	1.9	0.8	19.0	70.0	7.22	28.8	39.4	31
STC3	800	20000	370.4	0.5	1.2	1.6	33.0	68.0	2.25	10.6	18.6	30
STC4	8	3150	1	0.6	0.8	1.2	16.0	52.0	10.08	30.3	45.9	26.5

Les premières analyses des données montrent une corrélation assez significative entre le FMP déduit de l'essai à la table à secousses et la limite de liquidité qui peut s'exprimer sous la forme $FMP = -16 + 1.2 * WL (H_2O)$ avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.9$. Les points les plus éloignés de l'intervalle de confiance sont le SL2 et le SPCA2 qui représentent des minerais à forte activité argileuse ($VBS > 7$).

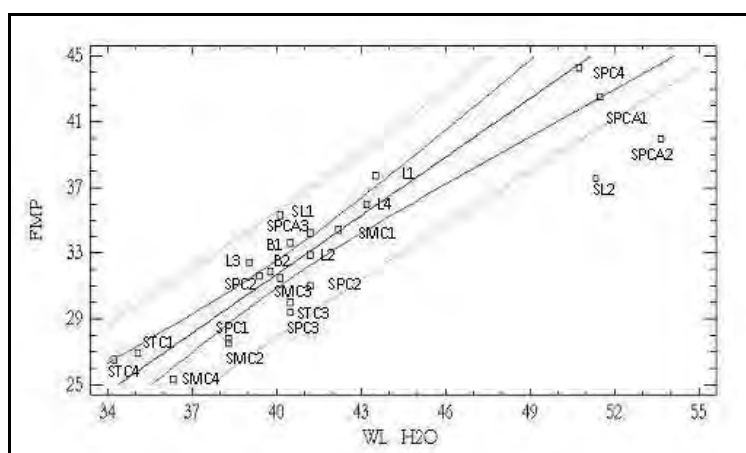


Figure 3: Corrélation entre le FMP et la limite de liquidité de la fraction fine (<0.4 mm)

Ces analyses montrent que dans les saprolites caillouteuses, l'indice d'altération ne présente pas une corrélation significative avec les infra 2 mm qui sont les plus vulnérables à la liquéfaction ; CF. Figure 4. Néanmoins, nous décelons deux courbes de tendance par groupe de minerais qu'il serait intéressant de confirmer et d'expliquer en réalisant des mesures complémentaires.

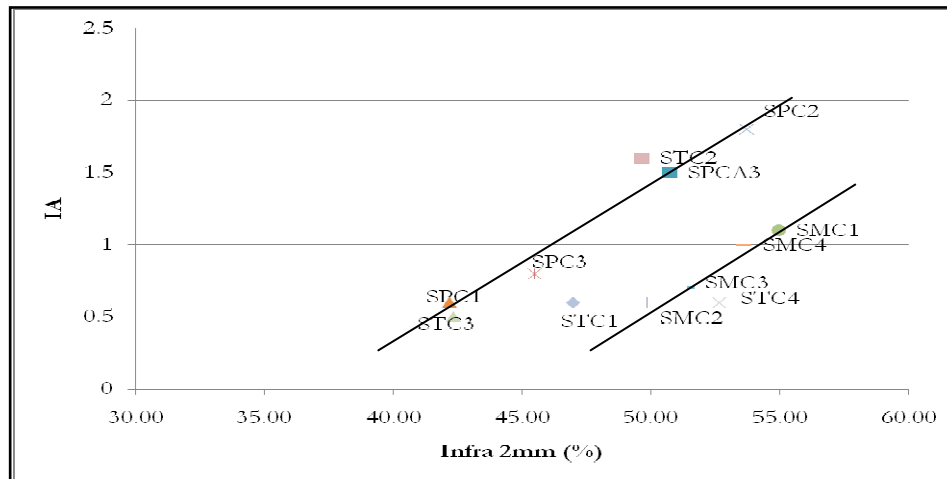


Figure 4 : *Corrélation entre l'indice d'altération et le pourcentage des infra 2 mm*

L'analyse en composantes principales réalisée sur l'ensemble des données de caractérisation montre que 73 % de la variance peut s'expliquer par deux axes principaux représentant respectivement 48 % et 25 % de poids :

L'axe 1 présente la granulométrie et oppose la variable D50 à la variable infra 2 mm. L'indice d'uniformité, corrélé avec le D50, montre que les granulométries sont plutôt serrées pour les minerais ayant des fortes valeurs de D50 (saprolites caillouteuses).

L'axe 2 présente l'argilosité des minerais, il est corrélé avec l'indice de plasticité et le VBS (activité des argiles) et dans une moindre mesure avec la limite de liquidité et le FMP (représenté par l'indice TML dans la figure 5).

Cette analyse permet de distinguer 3 groupes de minerais :

- Le groupe des latérites et blends ayant un fort pourcentage d'infra 5 μ m, un fort pourcentage d'infra 2 mm et une faible argilosité.
- Le groupe des saprolites fortement et moyennement caillouteuses, y compris les saprolites de laverie (graviers), caractérisé par un D50 élevé, une faible argilosité et un faible pourcentage d'infra 2 mm.
- Le groupe des saprolites terreuses peu caillouteuses et des saprolites laverie (gâteau), caractérisé par une forte argilosité des fines, un D50 faible et une proportion d'infra 2 mm forte.

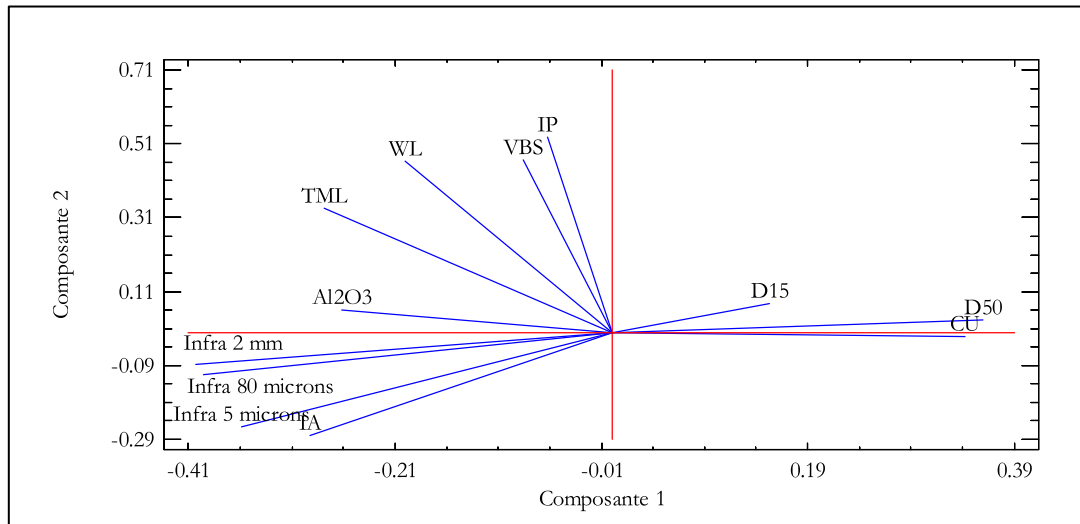


Figure 5 : Présentations des corrélations entre les différentes caractéristiques des minerais et les axes principaux

L'analyse discriminante met en évidence les deux facteurs discriminants suivants des 3 groupes identifiés précédemment :

Facteur 1 : fortement corrélé à la granulométrie (infra 2 mm et infra 80 μ m en signes opposés).

Facteur 2 : corrélé aussi à la granulométrie et à l'argilosité (VBS).

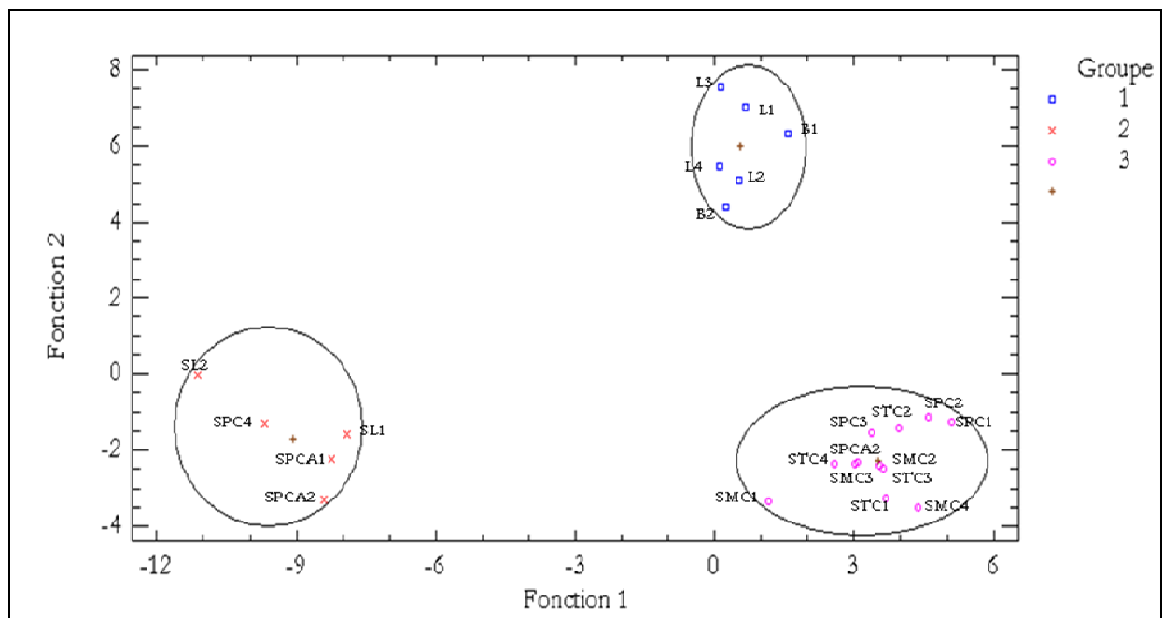


Figure 6: Représentation des groupes dans le plan des facteurs discriminants

En se basant sur les critères de liquéfaction définis dans le § 3.1, les différents groupes de minerais seront décrits comme suit :

Le groupe 1 (Latérites et blends) : Il est composé à plus de 95 % de limons argileux très plastiques. Avec un pourcentage des infra 80µm supérieur à 35% et un indice de plasticité IP proche de 12, les minerais appartenant à ce groupe seraient liquéfiables sous l'effet des vibrations lorsque leur humidité dépasse 35% (*Etat de l'art parasismiques*). Les valeurs du FMP mesurées sur ces minerais sont proches de 34% et viennent par conséquent confirmer la limite de liquéfaction définie dans les règles parasismiques.

Le groupe 2 (saprolites terreuses peu caillouteuses) : ce sont des limons sableux très plastiques à une proportion proche de 80 %. La fraction argileuse contenue dans ces minerais est très active (VBS proche de 6). Avec un pourcentage d'infra 80 µm supérieur à 35% et un IP proche de 40, la fraction limoneuse contenue dans ces minerais serait potentiellement liquéfiable pour des valeurs d'humidité proches de 42% (*règles parasismiques*). Les valeurs du FMP mesurées sur ces minerais (proche de 40%) confirment cette humidité critique.

Groupe 3 (saprolites caillouteuses) : ce sont des matériaux grossiers comportant une matrice composée de limons et de sables fins avec une proportion proche de 35 % et d'un mélange d'éléments grossiers (sable grossier, gravier et cailloux). La fraction fine étant liquéfiable, le potentiel de liquéfaction du minerai sera très dépendant du pourcentage des éléments grossiers (effet structure).

En se référant à la tendance moyenne par groupe, nous remarquons, que la composition granulométrique des infra 2 mm se ressemble globalement. Les trois groupes de minerais comportent 25 à 30% d'ultra fines (<5 µm) et 10 à 15% de sables (0.08 à 2 mm) et plus de 60% de limons.

Par ailleurs, nous soulignons une différence très remarquable entre la plasticité du groupe 2, proche de 40, et la plasticité des groupes 1 et 3 qui aura sans doute un effet non négligeable sur la liquéfaction de ces minerais.

Tableau 3: Caractéristiques moyennes des différents groupes des minerais (la valeur entre parenthèses représente l'écart type)

Groupe	Site	Code	D15 (µm)	D50	< 5 µm	< 80	<2	VBS	IP	FMP (%)
Gr 1	Poro SLN	L1	2.3 (0.3)	12.48 (3.46)	31.63 (5.12)	86.13 (4.98)	94.12 (3.93)	0.58 (0.72)	12.67 (3.67)	34.08 (2.28)
	NMC	L2								
	NMC	L3								
	SMGM	L4								
	SMT	B1								
	SMT	B2								
Gr 2	SLN	SL1	7.16 (3.86)	623.94 (1094.31)	14.0 (6.87)	61.48 (26.32)	78.44 (21.75)	5.74 (3.25)	43.6 (14.61)	40.08 (3.65)
	SLN	SL2								
	SLN Poum	SPCA1								
	SLN	SPCA2								
	Quaco	SPC4								
	SLN	SL3								
Gr 3	SLN	SPCA3	81.45 (226.39)	8862.5 (4910.25)	6.58 (2.78)	23.8 (5.93)	35.83 (7.26)	1.55 (1.54)	18.25 (6.58)	29.67 (2.97)
	SMT	SPC1								
	NMC	SPC2								
	SMP Poro	SPC3								
	NMC	SMC1								
	NMC	SMC2								
	SLN	SMC3								
	SMT	SMC4								
	SLN Thio	STC1								
	NMC Poya	STC2								
	SLN EDN	STC3								
	SMGM	STC4								

Pour la suite des études, et afin de tenir compte de la variabilité au sein d'un même groupe, nous avons sélectionné deux minerais représentatifs de chacun des différents groupes. Le premier est situé au centre du nuage représentatif du groupe ; CF. Figure 6, le deuxième, est le plus excentré dans le nuage. Ainsi les prélèvements qui ont été sélectionnés sont les suivants :

Groupe 1 : latérites L4 en provenance de Tontouta (SMGM), blend B2 en provenance de Monéo (SMT).

Groupe 2 : SPC4 en provenance d'Ouaco, et le SL2 en provenance de Tiébaghi (SLN).

Dans le cas du groupe 3, et afin d'analyser l'effet du pourcentage des grenus > 2 mm, nous avons sélectionné les six prélèvements suivants : le SPC2 en provenance de Kouaoua (NMC), le STC4 en provenance de Tontouta (SMGM), le SMC3 en provenance de Kouaoua (SLN), le SMC1 en provenance Nakéty (NMC), le SPC1 en provenance de Nakéty (SMT) et le SMC4 en provenance de Monéo (SMT)

3.3. Etude rhéologiques des minerais (CF. *rapport final Rhéological properties of New Caledonian nickel ores, UNC/LEM/LEMETA*)

L'étude rhéologique du minerai s'est focalisée sur l'analyse du comportement mécanique de la fraction fine du minerai en fonction de la variation de la teneur en eau (exprimée en fraction volumique des grains solides).

C'est une recherche fondamentale qui a été menée dans les laboratoires du LEM/LEMETA de l'université de Nancy en se basant sur des essais au rhéomètre. Cet équipement permet de mesurer la résistance au cisaillement non drainé « appelée contrainte seuil » et la viscosité d'un matériau semi-liquide à solide.

Cette recherche a permis de comprendre l'interaction entre l'eau et les grains solides dans la phase de liquéfaction du minerai et d'évaluer la contribution des différentes fractions granulométriques contenues dans le minerai.

3.3.1. Rhéologie des infra 63 μm

Les essais aux rhéomètres ont permis de démontrer que l'augmentation de la fraction volumique solide (ou diminution de l'humidité) entraîne une augmentation de façon exponentielle de la viscosité et de la résistance au cisaillement ; CF. Figure 7.

L'accroissement remarquable des deux paramètres (résistance au cisaillement et viscosité) se produit avec une fraction volumique de 30 %. Il correspondrait au passage de l'état liquide à un état plastique avec une teneur en eau que nous appelons « teneur en eau limite » ; CF. Tableau 4.

Les différences entre les valeurs de la teneur en eau limites déduites des essais au rhéomètre et les limites de liquidité (mécanique des sols) s'expliquent normalement par la coupure granulométrique qui est plus forte dans le cas de la mesure de la limite de liquidité (<0.4 mm).

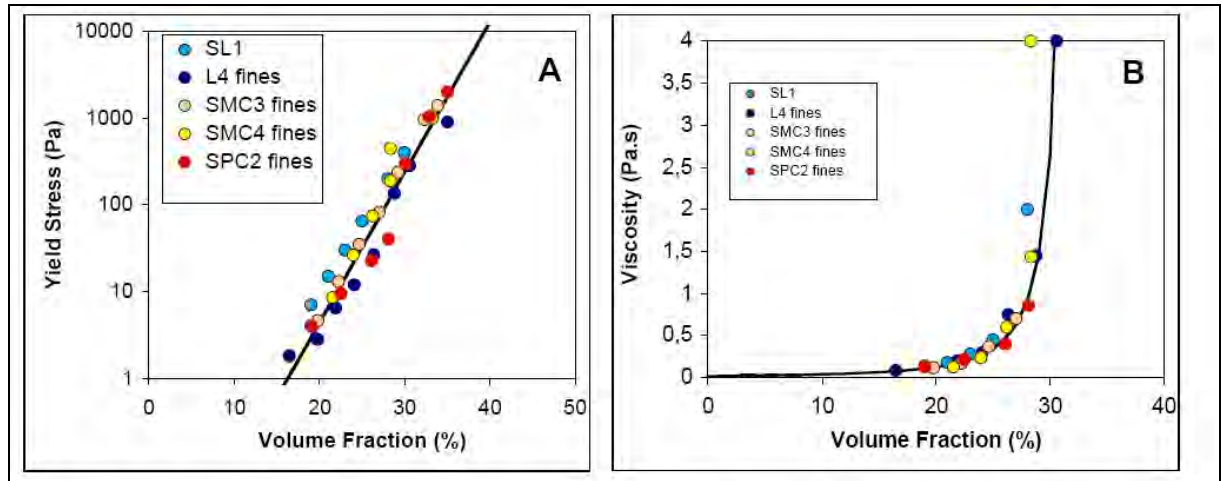


Figure 7 : Evolution de la résistance au cisaillement (A) et de la viscosité (B) en fonction du pourcentage de la fraction volumique des grains solides infra 63 µm

Tableau 4 : Correspondance entre la limite de liquidité et le la teneur en eau limite correspondant au changement d'état (liquide-plastique)

Minerai	Densité des grains solides	Limite de liquidité WL (mécanique des sols, % du poids des solides)	Teneur en eau limite (% du poids des solides)
Latérite L4	3.6	76	64
Saprolite laverie SL1	3	67	76
SPC1	2.8	62	84
SMC3	2.9	67	79
SMC4	2.9	57	79

La limite de liquidité WL (notion mécanique des sols) est mesurée sur les infra 0.4 mm

Nous notons aussi que pour des fractions volumiques comprises entre 25 et 35%, les infra 63 μm auraient les mêmes paramètres rhéologiques quel que soit leur site de provenance.

La comparaison entre la courbe d'évolution de la viscosité des minerais et la courbe théorique correspondant à l'assemblage de sphères, montre que le calage entre les deux courbes se fait correctement en adoptant une anisotropie de 2 pour les infra 63 μm ; CF. Figure 8. Cette anisotropie qui est confirmée par les mesures d'adsorption d'argon à haute résolution, montre que les infra 64 μm ont une forme allongée. Cette forme est considérée favorable vis-à-vis de la liquéfaction (amélioration de la RCC).

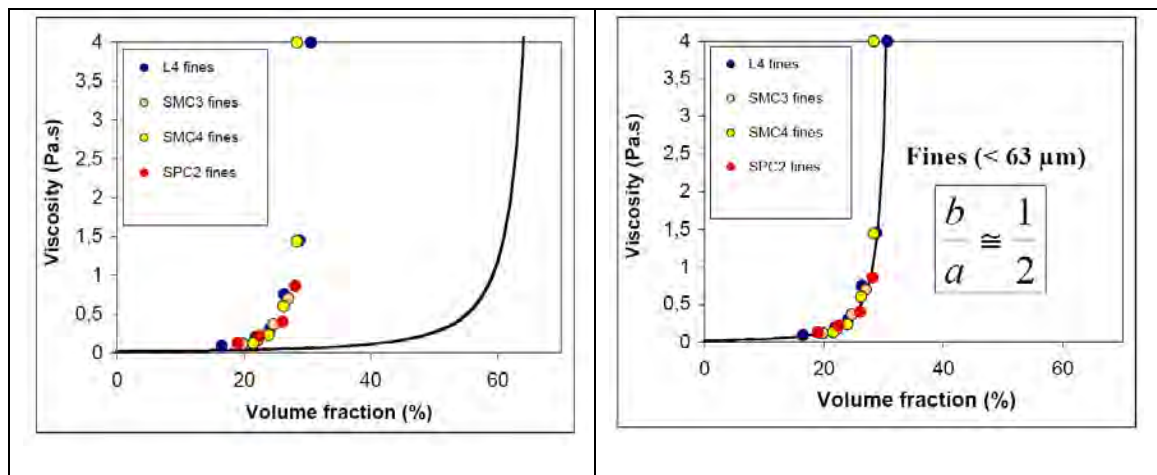


Figure 8 : Comparisons entre l'évolution de la viscosité avec la fraction des fines dans le cas des minerais et le modèle des sphères développé par Quemada 1977.

3.3.2. Influence de la fraction sableuse sur la rhéologie du minerai

Cette influence a été étudiée par substitution des infra 63 μm par des sables. Les mesures montrent que pour la même fraction volumique la résistance au cisaillement diminue lorsque le minerai contient plus de sable ; CF. Figure 9. L'évolution de la résistance au cisaillement en fonction de la fraction volumique effective montre que l'ensemble des points s'alignent sur une courbe de tendance qui correspond à une fraction volumique effective calculée avec un coefficient d'anisotropie de 2.1 pour les infra 63 μm et un coefficient de 1 pour les sables.

Cette analyse montre que les fines limoneuses constituent des éléments stabilisants et confirme la vulnérabilité vis-à-vis de la liquéfaction, des minerais qui contiennent une fraction sableuse importante.

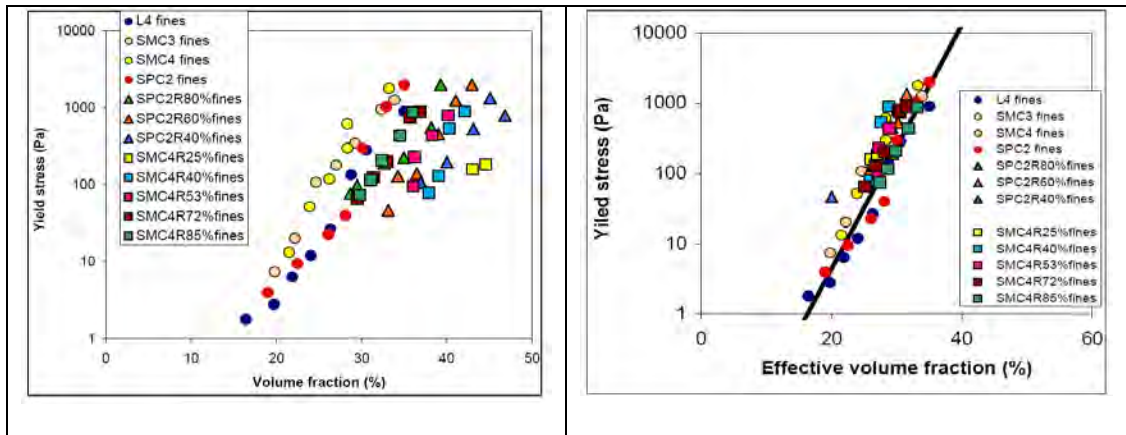


Figure 9 : Influence de la fraction sableuse sur la rhéologie du minerais

3.3.3. Influence des vibrations sur la résistance au cisaillement des minerais

Pour des fortes valeurs d'humidité (40%), la résistance au cisaillement et la viscosité du minerais, diminuent sous l'effet des vibrations. Ainsi le matériau devient plus fluide et moins résistant.

L'influence des vibrations dépend de l'énergie de vibration et de l'humidité du matériau. Les matériaux les plus humides sont les plus sensibles aux vibrations. Pour chaque humidité, il semble y avoir un seuil d'énergie de vibration au-delà duquel les caractéristiques mécaniques du minerais seront affectées.

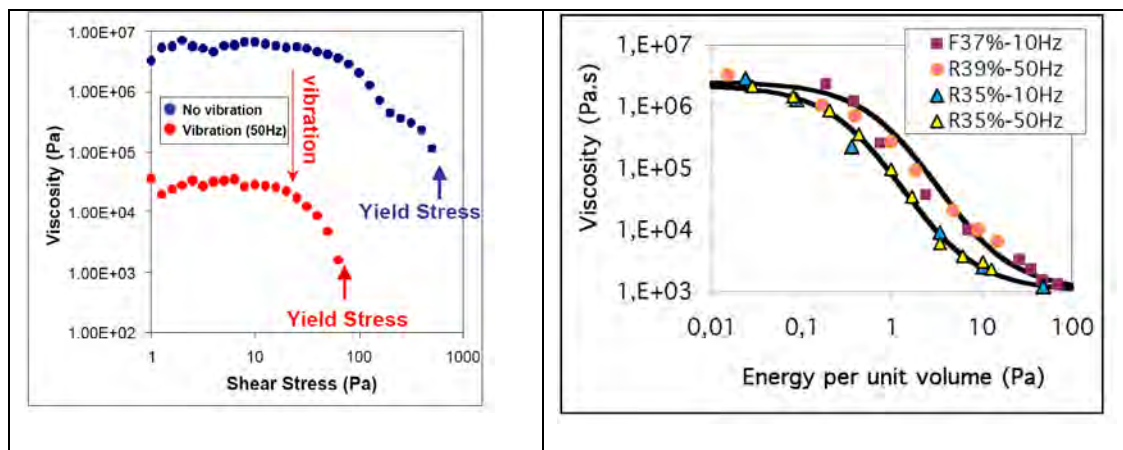


Figure 10 : Influence des vibrations sur la rhéologie des minerais (cas du SMC3)

Ainsi, les résultats de l'étude rhéologique confirme l'importance de la granulométrie de la fraction fine, notamment le rôle fluidifiant des sables ainsi que l'influence de l'énergie de vibration sur la dégradation de la résistance mécanique et la mobilité des minerais.

D'après cette analyse, nous déduisons aussi qu'il serait possible, en fixant l'énergie de vibration, de définir une humidité critique en dessous de laquelle le minerais ne sera pas affecté par les vibrations.

3.4. Définition des conditions de liquéfaction des minerais à partir d'essais de cisaillement cycliques réalisés en laboratoire

Référence : *Etude du risque de liquéfaction de minerais nickélifères UR Navier – Géotechnique CERMES (ENPC/LCPC) 27 juin 2011*

En se basant sur la classification présentée dans le § 3.3, nous avons procédé à des essais de cisaillement en laboratoire réalisés sur les prélèvements représentatifs des différents groupes de minerais.

Dans le cas des minerais fins des groupes 1 et 2, les essais de cisaillement cyclique ont été réalisés dans une cellule de 70 mm de diamètre, sur des coupures à moins de 10 mm.

Dans le cas des minerais grenus du groupe 3, les essais de cisaillement cyclique ont été réalisés dans une cellule de 300 mm de diamètre, sur des échantillons écrêtés à 30 mm.

En parallèle avec ces essais, nous avons réalisé des essais avec la table à secousses selon le protocole du recueil du BC Code.

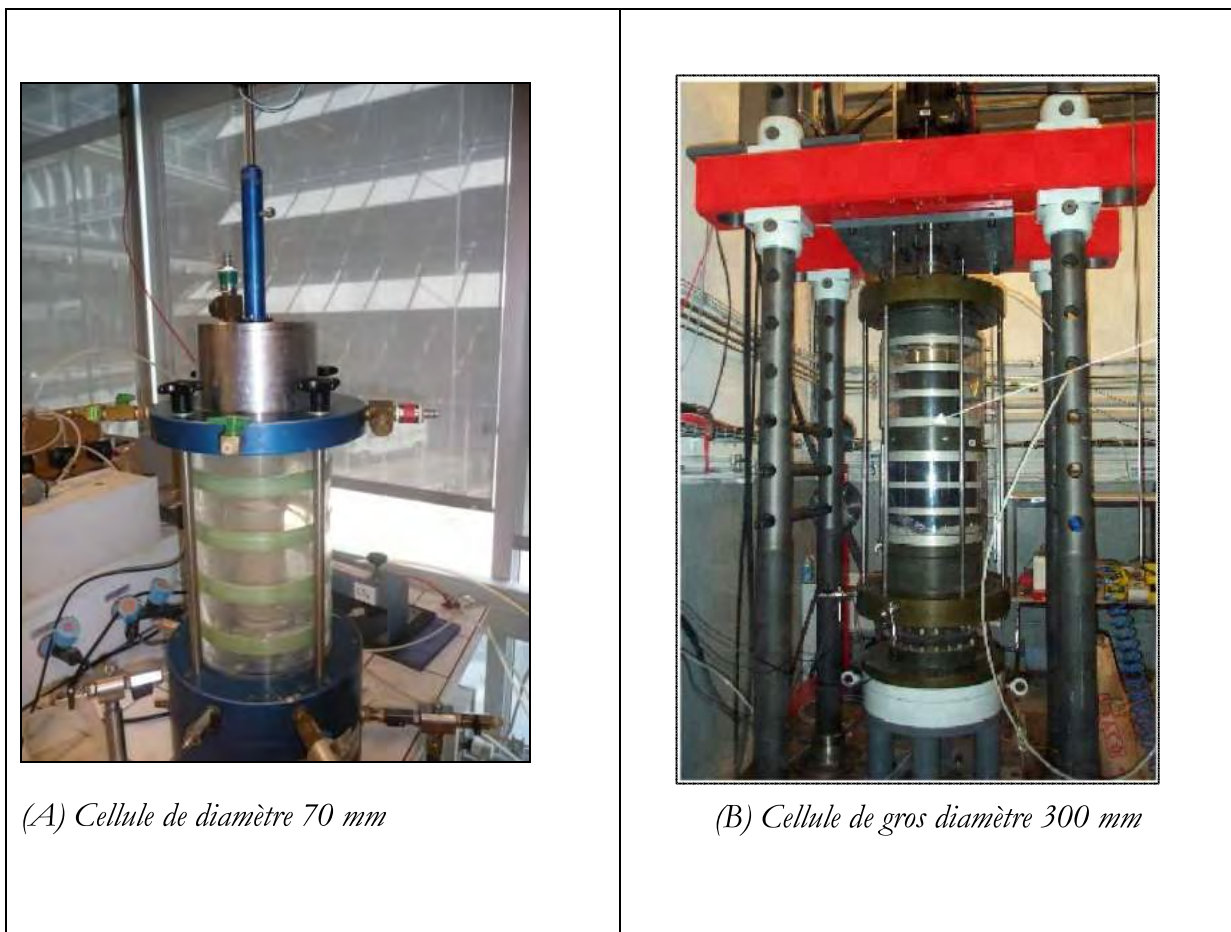


Figure 11 : *Dispositifs des essais de cisaillement triaxial cyclique*

3.4.1. Evaluation du potentiel de liquéfaction des minerais saturés

Le potentiel de liquéfaction des sols est souvent estimé par la détermination de la résistance au cisaillement cyclique du sol à l'état saturé.

En admettant le principe que la liquéfaction serait plutôt liée au comportement de la fraction fine, nous avons focalisé notre analyse sur les minerais fins du groupe 1 et 2.

La première série d'essais s'est limitée à un cisaillement triaxial monotone (essais consolidés non drainés avec mesure de la pression interstitielle). Elle a montré que les minerais du groupe 1 (latérites et blends) sont caractérisés par une phase plastique contractante (écrouissage négatif), et les minerais du groupe 2 sont caractérisés par une phase plastique dilatante. Ceci signifie que les minerais du groupe 2 sont moins sensibles à la liquéfaction que ceux du groupe 1.

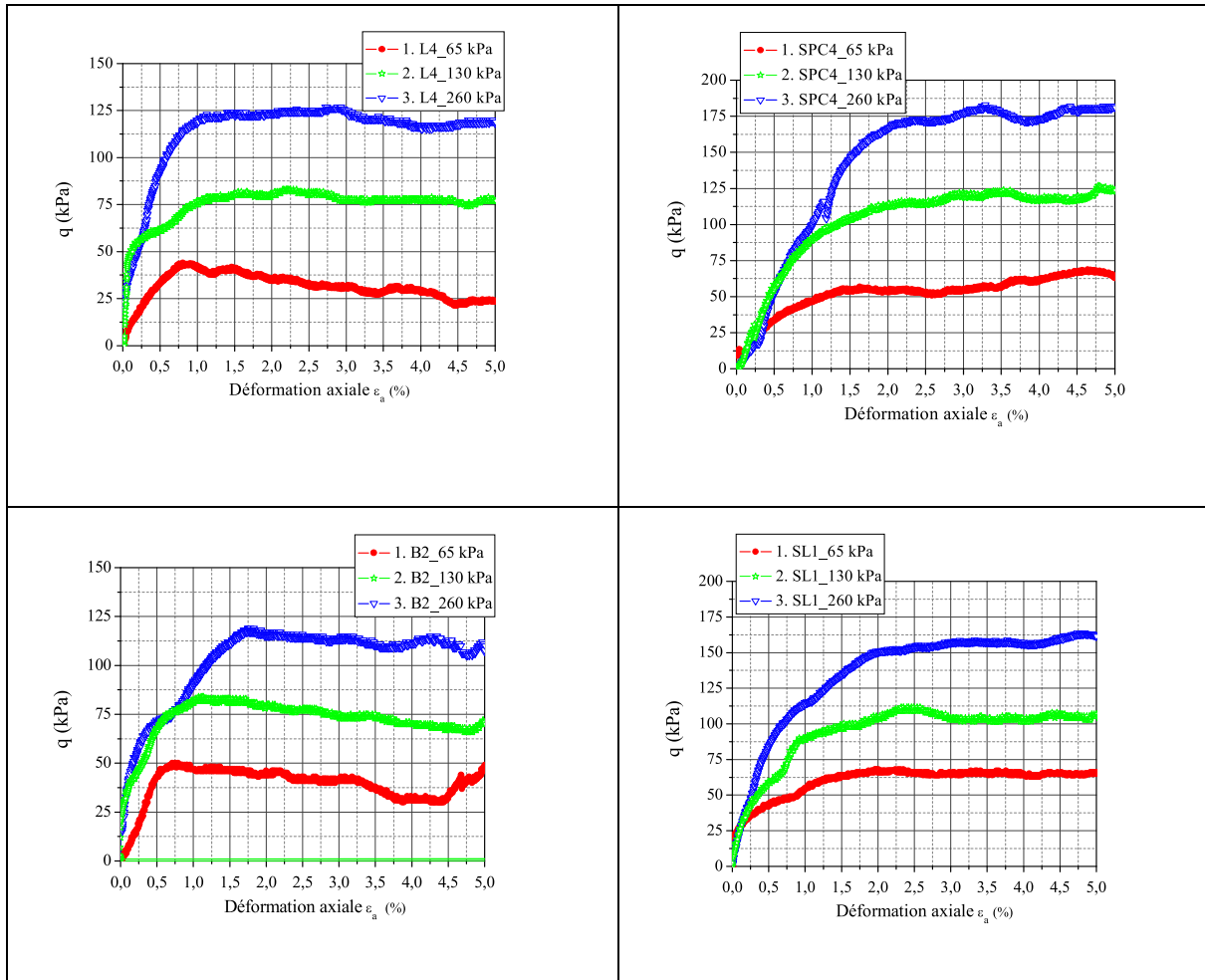


Figure 12 : Courbes effort/déformation en cisaillement consolidé non drainé avec mesure des pressions interstitielles (minerais latérites L1, blends B2, Saprolites SPC4 et SL1)

Ces mêmes essais montrent que les minerais du groupe 2 qui sont plus argileux se distinguent des minerais du groupe 1 par une plus forte cohésion intrinsèque et un angle de frottement plus faible ; CF. Tableau 5.

Tableau 5 : Caractéristiques mécaniques intrinsèques des minerais des groupes 1 et 2

Minerai	Type de minerai	Cohésion intrinsèque (KPa)	Angle de frottement en (°)
L4	Latérites	1.0	33.9°
B2	Blendes	1.0	32.0°
SPC4	Saprolites terreuses	7.0	29.5°
SL1	Saprolites terreuses	11.4	28.5°

L'analyse de l'évolution de la cohésion non drainée en fonction de la contrainte de consolidation, qui simule un cisaillement rapide des minerais saturés situés à différentes profondeurs de la cale d'un minéralier, montre que les minerais du groupe 2 présentent une meilleure résistance aux sollicitations rapides et ce à cause de leur plus forte cohésion et de leur caractère dilatant ; CF. Figure 13. Ces courbes montrent que pour des minerais situés entre 0 et 2.5 m de profondeur de la cale, la cohésion non drainée serait de 10 à 20 KPa dans le cas des latérites et de 15 à 25 KPa dans le cas des saprolites terreuses. La cohésion non drainée peut dépasser 60 KPa pour les minerais situés en fond de cale.

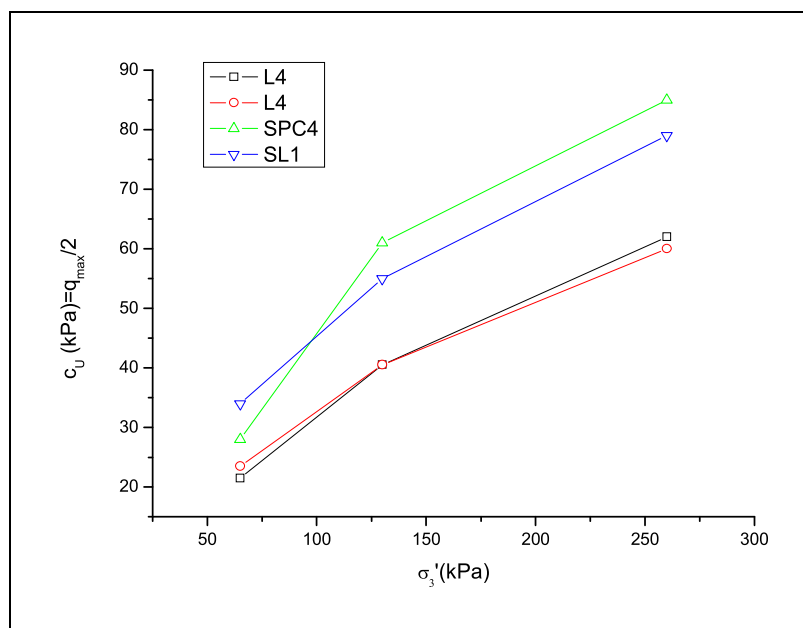


Figure 13: Evolution de la cohésion non drainée en fonction de la contrainte de consolidation

La deuxième série d'essais est réalisée en cisaillement cyclique triaxial sur des éprouvettes de minerai préalablement saturées en eau. On constate au fur et à mesure que le nombre de cycles augmente, le volume de l'éprouvette de minerai tend à diminuer dans un milieu complètement fermé (contraction) induisant une augmentation progressive des surpressions et une diminution de la contrainte effective jusqu'à son annulation. Ce phénomène est accompagné d'une augmentation très rapide des déformations. A ce stade de l'essai, le minerai est supposé liquéfié.

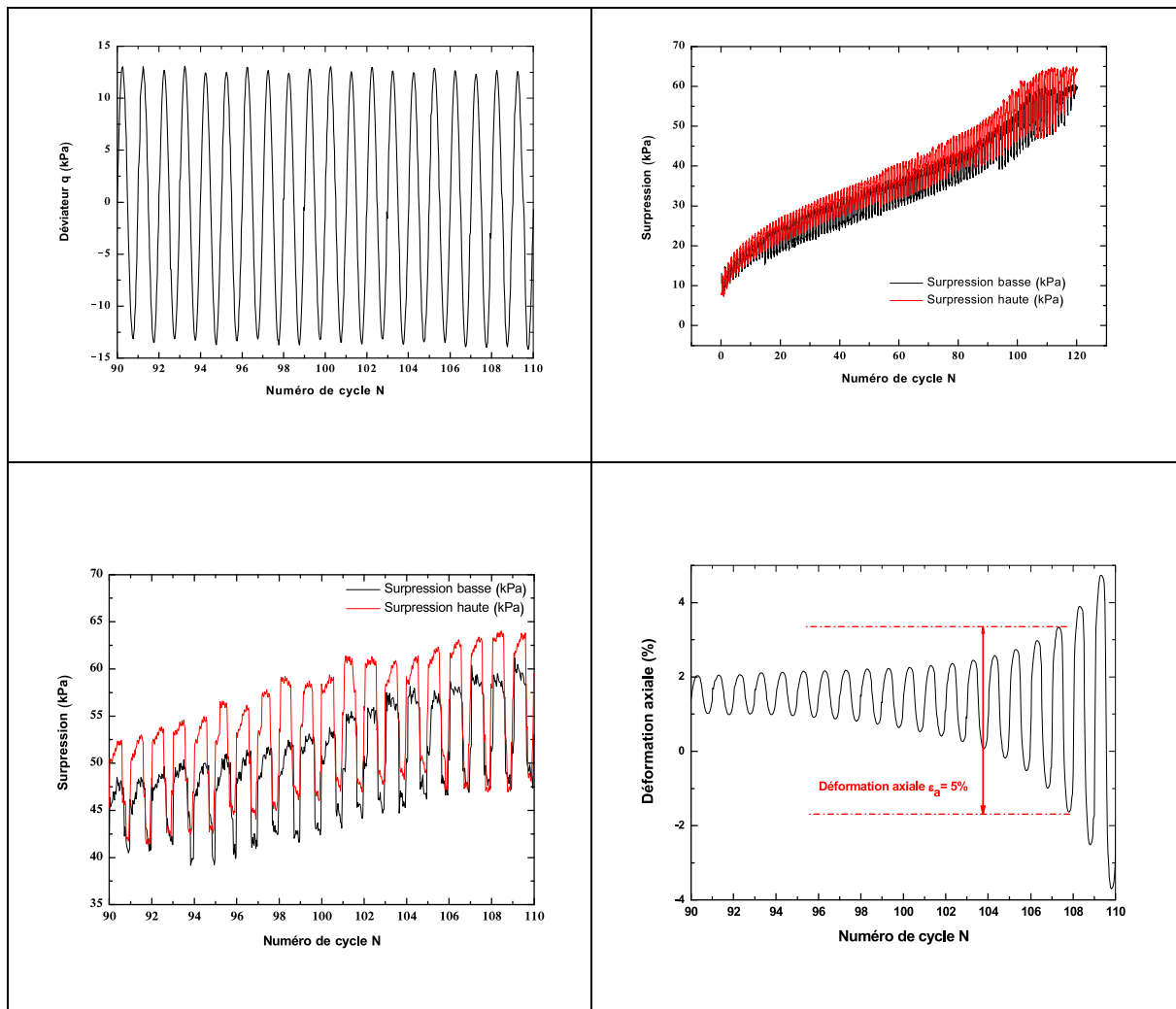


Figure 14: Courbes d'évolution des pressions interstitielles et des déformations au cours de l'essai cyclique (latérites L4, consolidation sous 65 KPa, ratio de cisaillement 0.1)

Les courbes d'évolution du taux de cisaillement en fonction du nombre de cycles produisant la liquéfaction confirment que les minerais du groupe 1 (latérites) se liquéfient avec des taux de cisaillement deux fois plus élevés que les minerais du groupe 2 (SPC4) soit un taux de 0.075 pour les latérites et 0.16 pour les saprolites terreuses.

Ainsi, nous démontrons que les minerais latéritiques sont plus sensibles à la liquéfaction que les minerais de saprolites terreuses argileuses. La forte argilosité serait probablement à l'origine de l'amélioration de la résistance au cisaillement cyclique des saprolites terreuses argileuses SPC4. Compte tenu de la grande hétérogénéité des saprolites terreuses, cette tendance n'est forcément pas généralisable.

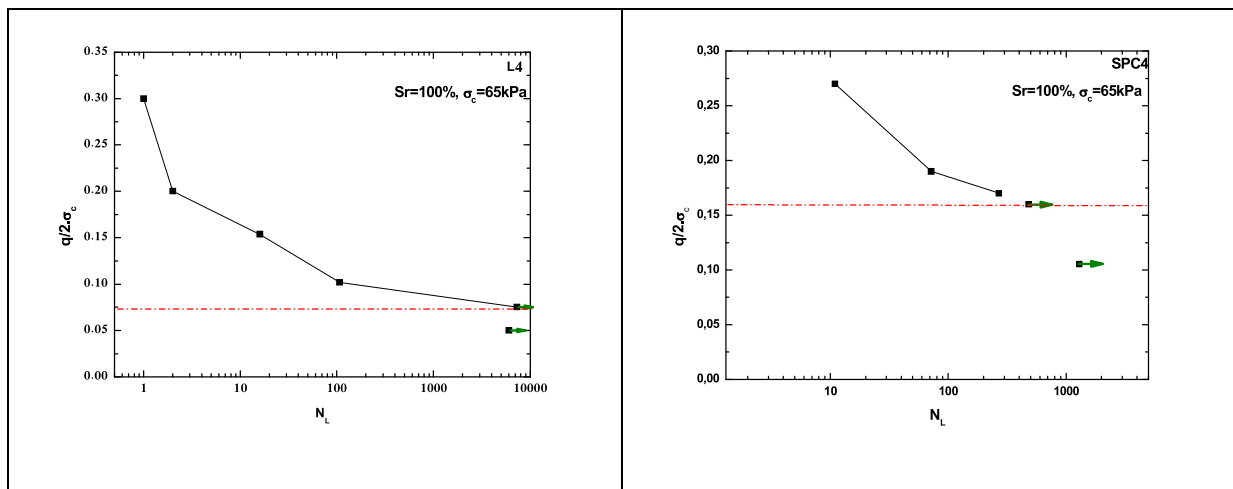


Figure 15: *Courbes de liquéfaction des minerais L4 (groupe I) et SPC4 (groupe II).*

3.4.2. Recherche de l'humidité critique produisant la liquéfaction du minerai

Le minerai de nickel transporté dans les minéraliers n'est pas saturé en eau, nous cherchons ainsi à définir l'humidité critique au-delà de laquelle le minerai peut se liquéfier au cours du transport.

D'après l'état de l'art, au cours d'un essai de cisaillement cyclique, l'humidité critique est liée aux deux facteurs suivants :

- Le taux de cisaillement (contrainte de cisaillement/contrainte de confinement), qui dépend des niveaux de sollicitation induites par la houle au cours du transport du minerai.
- La densité du minerai qui elle-même est dépendante de l'humidité du matériau (courbe Proctor).

3.4.2.1. Définition du taux de cisaillement induit par les mouvements du minéralier

Pendant le transport, le minéralier est soumis à plusieurs sollicitations parmi lesquelles on trouve le mouvement le plus vulnérable qui est le roulis et qui correspond à une rotation autour de l'axe transversal du navire. Les angles de roulis varient en général de +/- 10 à 15° dans les conditions normales mais peuvent atteindre +/- 20° dans les conditions exceptionnelles. Cette rotation induit une accélération horizontale et verticale soumettant le minerai à des cisaillements cycliques.

Pour calculer ces cisaillements, nous avons réalisé des modélisations numériques aux éléments finis (Cf. Synthèse sur la modélisation numérique de la liquéfaction réf: Mecater/CNRT NICKEL/42/EK/B/2011) ; CF. Figure 16.

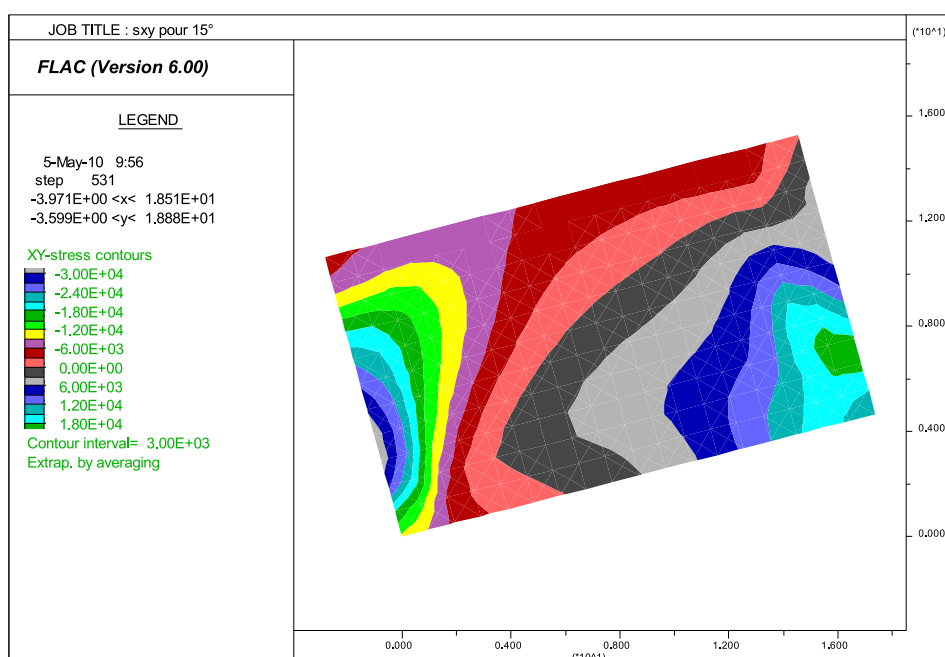


Figure 16: Répartition des contraintes de cisaillement dans une cale pour un angle de gîte de 15°

Ces calculs montrent que le taux de cisaillement est variable en différents points de la cale, ce taux est proche de 0.3 pour des gîtes de 15° mais peut atteindre 0.4 pour des gîtes de 25° ; CF Tableau 6.

Tableau 6 : Taux de cisaillement pour trois gîtes à différentes profondeurs

Gîte	10°			15°			25°		
	2.5 m	5 m	7.5 m	2.5 m	5 m	7.5 m	2.5 m	5 m	7.5 m
Taux de cisaillement	0,24	0,22	0,19	0,30	0,24	0,20	0,40	0,28	0,20

D'autres calculs à l'équilibre limite ont été réalisés pour analyser la stabilité de la surface du minerai sous différentes gîtes. Il en ressort que la cohésion non drainée requise pour une gîte de 15° serait proche de 13 KPa ; CF. Figure 17.

En considérant ces résultats, nous avons fixé le taux de cisaillement pour les essais cycliques à 0.3.

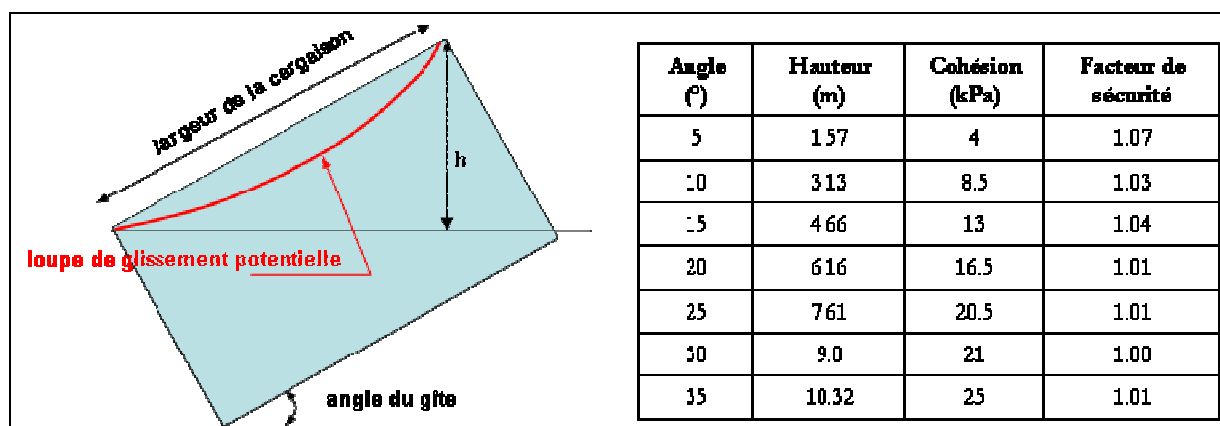


Figure 17 : Cohésion nécessaire à la stabilité de la cargaison en fonction de l'angle de gîte

3.4.2.2. Définition de la densité des minerais

Pour la reconstitution des éprouvettes de minerai à des humidités variables, nous avons adopté la démarche proposée dans le recueil du BC Code. Le minerai est préparé avec une humidité donnée puis mis en place dans un moule par couches compactées avec une énergie constante. Ce compactage doit permettre de retrouver la densité moyenne du minerai dans la cale.

Ainsi conformément à l'essai Proctor, la densité après compactage varie en fonction de l'humidité en suivant une courbe en cloche. Le maximum de densité est atteint lorsque le minerai est compacté à une humidité optimale ; CF Tableau 7. Pour les valeurs d'humidité qui dépassent l'humidité optimale, la densité obtenue après compactage diminue.

Nous constatons d'après les essais d'absorption réalisés sur les supra 2 mm que l'humidité des grenus est limitée à moins de 17% alors que celle des fines peut dépasser les 40%. L'eau se concentre de façon préférentielle dans les fines.

Tableau 7: Valeurs des couples densité/ humidité optimale pour les minerais des groupes 1 et 2

Minerai	L1	L4	B2	SPC4	SL1
Densité des grains solides	3.64	3.63	3.31	3.38	3.03
Teneur en eau à l'optimum (%)	37.5	28.6	31.5	36.3	27.5
Densité apparente sèche à l'optimum	1.12	1.50	1.29	1.05	1.34

Tableau 8 : Valeurs des couples densités/ humidité optimale pour les minerais du groupe 3

Minerai	SPC1	SPC2	SMC3	SMC4	SMC1	STC4
Densité des grains solides (0-30mm)	2.82	3.18	2.93	2.88	2.92	2.81
Densité des grains solides <2mm	2.73	3.03	2.82	2.86	2.89	2.73
Taux d'absorption d'eau de la fraction >2 mm (%)	15	15	17	16	17	16
Humidité à l'optimum (%)	24.8	25.9	24.8	28	25.9	24.8
Densité sèche à l'optimum	1.47	1.48	1.42	1.34	1.34	1.42

La superposition des courbes de saturation avec la courbe de compactage, montre que l'humidité optimale de compactage, correspond à un degré de saturation de 98% pour les minerais du groupe 1 et à un degré de saturation de 85% pour les minerais du groupe 2.

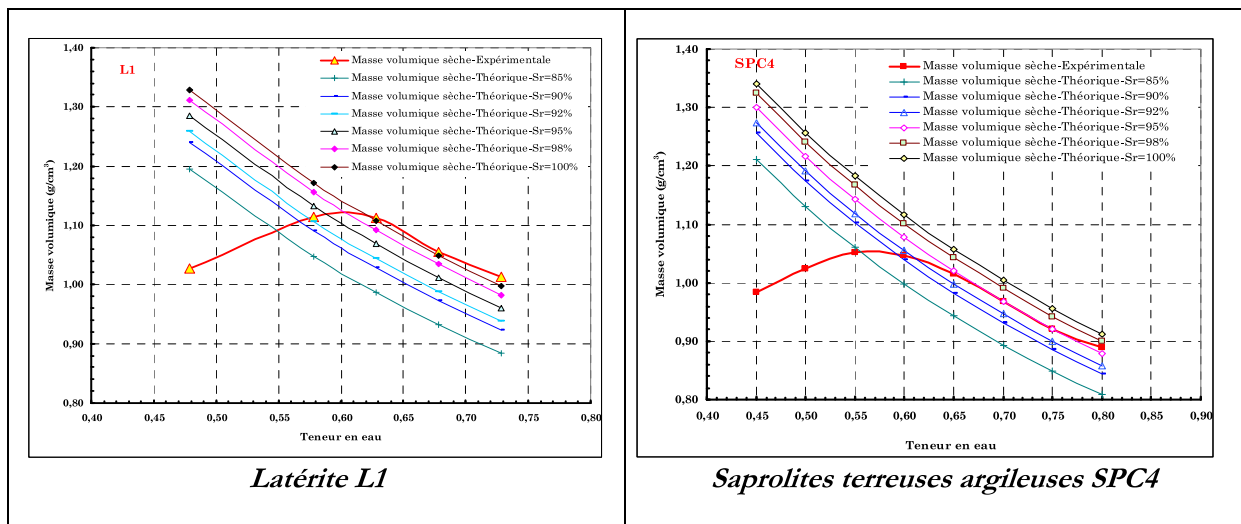


Figure 18: Superposition des courbes de saturation avec la courbe de compactage

Autrement dit, pour un même degré de saturation, la compacité des minerais du groupe 2 sera meilleure que celle des minerais du groupe 1. Ainsi on peut s'attendre à ce que l'humidité critique vis-à-vis de la liquéfaction soit plus forte pour les minerais du groupe 2.

3.4.2.3. Résultats des essais cycliques

Plus de 50 essais de cisaillement cycliques ont été réalisés sur 11 minerais différents avec un taux de cisaillement de 0.3 et avec des humidités variables. La liquéfaction est supposée atteinte lorsque la contrainte effective s'annule ou lorsque la déformation axiale s'élève à 5%.

Dans le cadre de ces essais, la liquéfaction se produit avant la saturation du minerai. Au cours de l'essai et sous l'effet de la contraction de l'éprouvette, le liquide interstitiel composé d'eau et d'air se met en pression et provoque la rupture. Celle-ci se produit au cours de la phase de réduction de la contrainte verticale (allongement avec rétrécissement local du diamètre) ; CF. Figure 19.

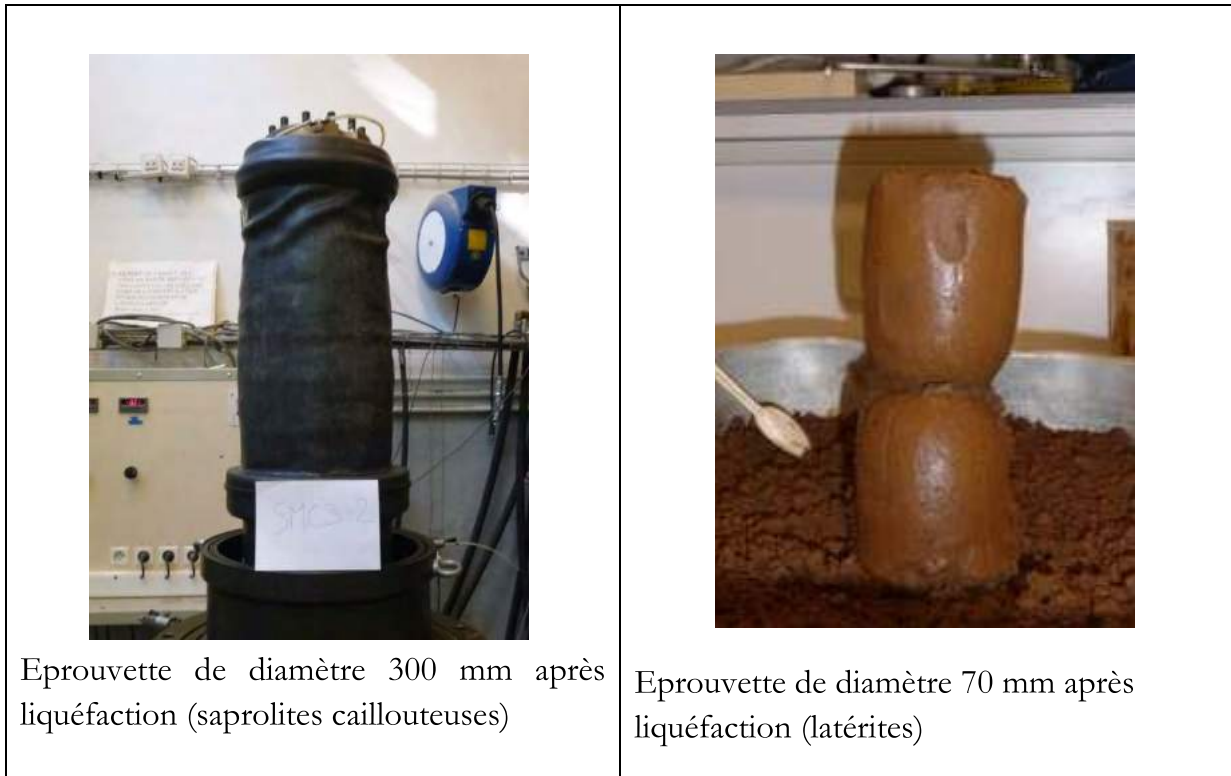


Figure 19 : Photos des éprouvettes des minerais après liquéfaction sous cisaillement cyclique

Ces essais montrent que la liquéfaction se produit avec un degré de saturation plus fort pour les minerais du groupe 2 (92%) que pour les minerais du groupe 1 (85%). Ce qui s'expliquerait par l'importance de la compacité et par l'argilosité des minerais du groupe 2 ; CF Tableau 9.

Tableau 9 : Caractéristiques mécaniques intrinsèques des minerais des groupes 1 et 2

Type d'essai		Groupe I		Groupe II		
		L1	B2	SPC4	SL2	SPCA1
Triaxial cyclique non drainé	Humidité (%)	35.1	30	35.9	37.5	37.1
	Degré de saturation (%)	85	85	85	92	92

3.4.2.4. Influence du taux de cisaillement cyclique

Nous démontrons que lorsque les minerais ne sont pas saturés, l'humidité critique n'est pas sensible à une variation du taux de cisaillement inférieure à 25% ; CF. Tableau 10.

Ainsi nous pouvons considérer que si le minerai est transporté à une humidité inférieure à son humidité critique, il pourra résister à un taux de cisaillement de 0.3 correspondant à des variations de gîte de +/- 15° sur tout le trajet et résistera à une variation de gîte de +/- 25° sur au moins une partie du trajet.

Tableau 10: Sensibilité de la valeur de l'humidité critique du minerai aux taux de cisaillement cyclique ($q/2\sigma'_c$)

Nom de l'essai	Mise en place	Humidité h [%]	ρ_h [g/cm ³]	Sr [%]	N	$q/2\sigma'_c$	σ'_c [kPa]	q [kPa]	Période (s)	N _L
SL2-2-4	Humide	37,5	1,63	92	1980	0,28	65	35,9	10	Non liquéfié
SL2-2-6	Humide	37,5	1,63	92	1463	0,32	32,5	20,6	10	Non liquéfié
SL2-2-7	Humide	37,5	1,63	92	2883	0,38	32,5	24,7	10	Non liquéfié

3.4.2.5. Analyse des valeurs des humidités critiques pour les différents minerais étudiés

Les résultats des essais sont synthétisés dans le tableau 11. Nous constatons que les humidités critiques varient selon le pourcentage des grenus (>2 mm) contenus dans le minerai.

En effet, les minerais du groupe 1 et 2 ayant un pourcentage de grenus inférieur à 30% présentent une humidité critique supérieure à 30 %. Pour les minerais grenus du groupe 3, l'humidité critique varie de 29%, pour les minerais moyennement caillouteux, à 24 %, pour les minerais les plus caillouteux. Ce résultat est tout à fait normal car il reflète la faible rétention d'eau dans les grenus.

Pour les minerais du groupe 3, nous rappelons que ces valeurs d'humidité critique correspondent aux échantillons de minerais dépourvus des supra 30 mm.

Tableau 11: Valeurs des humidités critiques correspondant aux différents minerais étudiés

Minerai	Supra 2 mm % dans les infra 30 mm	VBS	WL (H ₂ O)	H ₂ O totale critique (essais cycliques)	FMP Table à secousses (%)	H ₂ O des fines (cycliques)
L1	02	0.1	43.5	35.1	37.7	35.1
B2	6	0.7	39.8	30	32	31.2
SL2	0.8	7.8	51.2	37.5	39.4	37.7
SPC1	50	1	38.3	24	27.8	36.8
SPC2	33	0.7	39.4	29	31.6	36.9
SPCA1	27	7	51.5	37.1	42.8	44.1
SPC4	18	6.7	50.7	35.9	44.3	40.2
SMC1	43	3	42.2	25	34.4	35.4
SMC3	0	0.6	40	31	31.5	31
SMC3	45	0.6	40	25	31.5	36.1
SMC3	60	0.6	40	25	31.5	43.1
SMC4	35	1.4	36.3	24	25.3	30.2
STC4	34	1.2	34.2	25	26.5	32.4

3.4.2.6. *Analyse de la cohérence entre les résultats des essais cycliques et les résultats des essais à la table à secousses*

Cette analyse montre une très bonne cohérence entre les deux types d'essais pour la plupart des minerais à l'exception des minerais ayant une forte argilosité (saprolites terreuses très argileuses) et les minerai moyennement à très caillouteux. En effet, pour ces deux types de minerais, l'essai à la table à secousses donne des humidités critiques qui sont nettement plus élevées avec un écart qui peut dépasser 6 points d'humidité.

Pour les minerais argileux, les déformations plastiques qui se développent avant l'effondrement de la structure du minerai peuvent constituer un biais dans l'interprétation de l'essai de la table à secousses.

Pour les minerais caillouteux l'écart d'humidité critique entre les deux méthodes provient de l'effet des grenus. Ces derniers sont limités à 7 mm pour l'essai à la table à secousse et

montent jusqu'à 30 mm pour l'essai TVP. Ainsi, l'écart entre les humidités critiques devient très réduit, pour des échantillons ayant des coupures granulométriques comparables (minerai SMC3 du tableau 11).

En conclusion, l'utilisation de l'essai à la table à secousses n'est pas adaptée à l'ensemble des minerais de nickel.

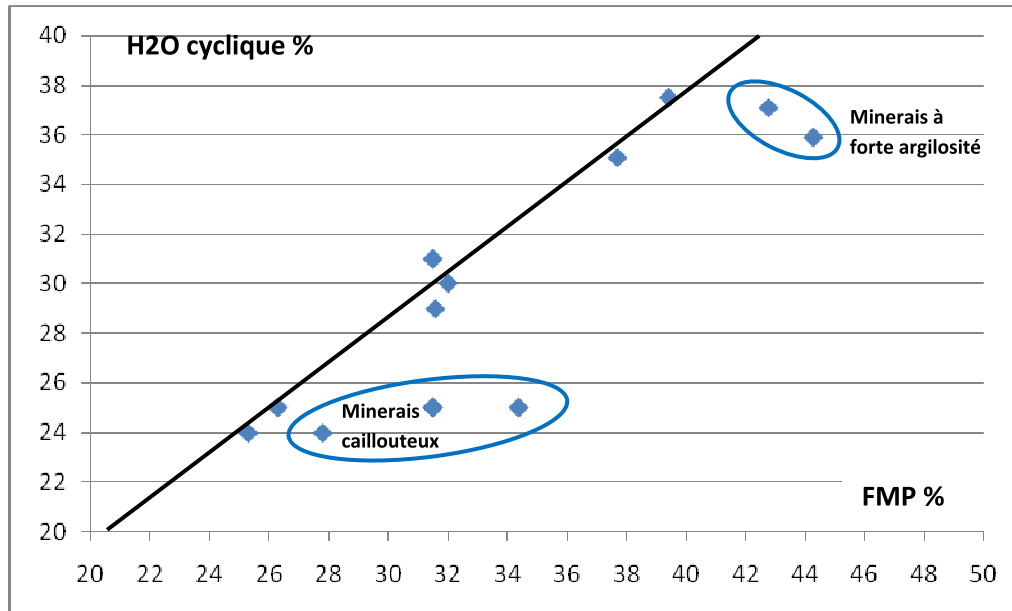


Figure 20: Cohérence entre les valeurs de l'humidité critique obtenues par essais cycliques et par essais à la table à secousses

3.4.2.7. Analyse de l'influence des grenus sur la liquéfaction

La présence des grenus dans les minerais peut avoir deux effets :

- Le premier est purement physique et consiste à réduire l'humidité globale du minerai et ce à cause de la faible rétention d'eau des éléments grenus (supra 2 mm); 15 à 17 % d'humidité contre 35 à 40 % dans les fines.
- Le deuxième est mécanique et consiste à former des inclusions qui améliorent la résistance au cisaillement cyclique.

Afin d'analyser l'effet mécanique des grenus nous avons ignoré le premier effet en travaillant avec l'humidité critique dans les fines. En effet, pour chaque valeur d'humidité critique, nous avons calculé une humidité dans les fines en tenant compte du pourcentage des grenus et d'une humidité moyenne fixe dans les grenus de 5% (*cailloux secs au moment de la réalisation des essais*); CF. Tableau 11. Nous considérons aussi que plus l'humidité critique dans les fines est forte plus le minerai résiste à la liquéfaction.

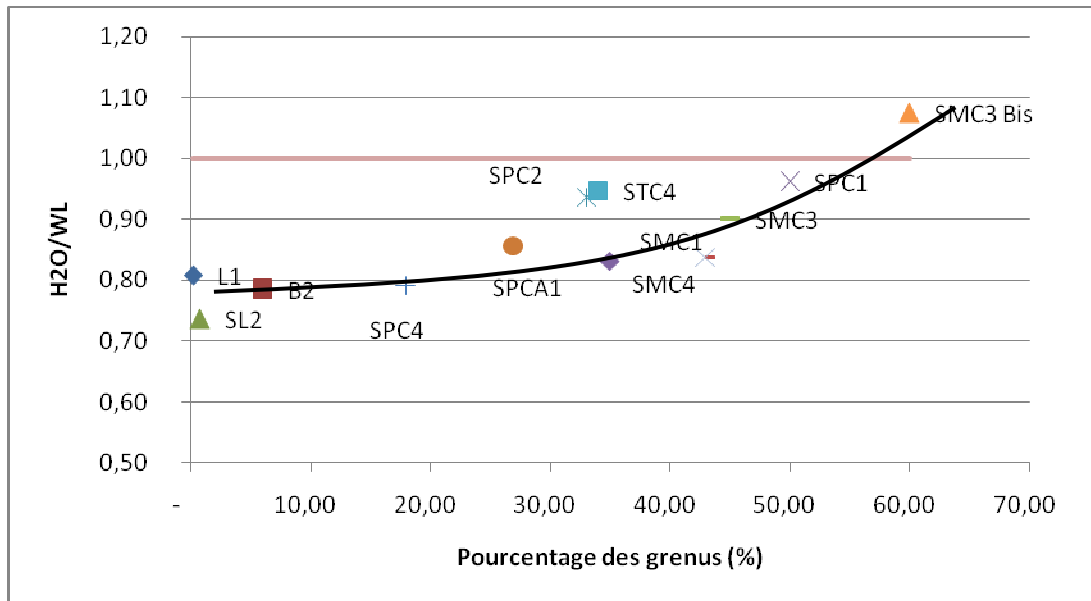


Figure 21: Influence des grenus sur la résistance au cisaillement cyclique des fines (essais cycliques).

NB : La limite de liquidité WL est une notion de mécanique des sols, qui correspond à la valeur d'humidité au-delà de laquelle le matériau se transforme à l'état liquide lorsque sa structure est détruite (remaniée).

L'évolution du rapport de l'humidité critique dans les fines par la limite de liquidité en fonction du pourcentage des grenus est présentée dans la figure 21. Cette évolution montre que plus le pourcentage des grenus augmente, plus l'humidité critique dans les fines est forte :

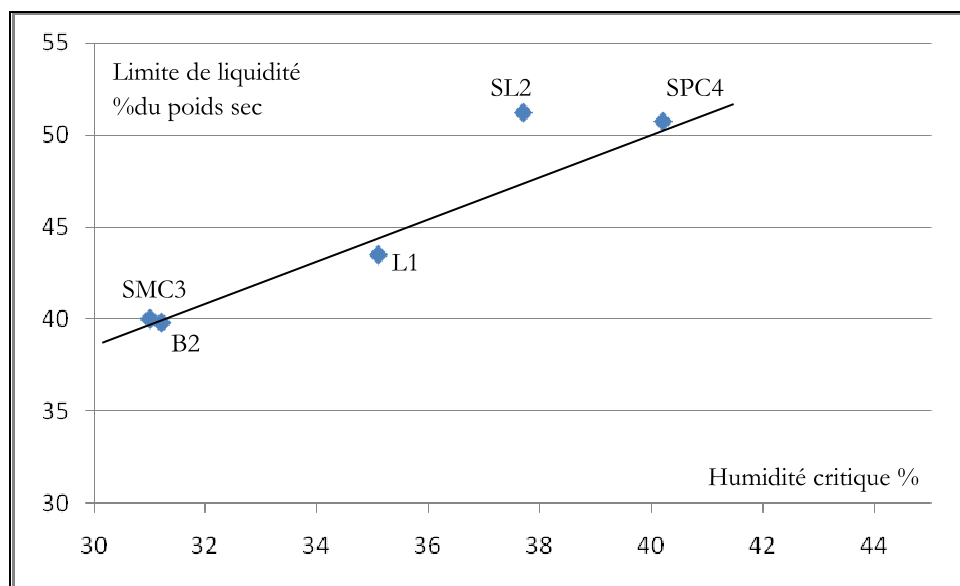
- Pour les minerais du groupe 1 et 2 comportant moins de 30 % de grenus, la liquéfaction se produit pour des humidités dans les fines qui sont inférieures à la limite de liquidité. Après la destruction de la structure granulaire, le minerai reste à l'état solide. Autrement dit le minerai garde une résistance au cisaillement non drainée résiduelle significative (>10 KPa).
- Pour les minerais du groupe 3, comportant de 30 à 60 % de grenus, la liquéfaction se produit avec des humidités des fines nettement supérieures à la limite de liquidité. Après liquéfaction, la quantité d'eau contenue dans le minerai est suffisante pour transformer les fines à l'état liquide avec une très faible résistance au cisaillement résiduel (moins de 3 KPa).

La courbe de tendance montre que les grenus même à faible proportion améliorent légèrement la résistance au cisaillement cyclique du minerai. Cette courbe met en évidence une amélioration remarquable au-delà de 45% de grenus. Ainsi, les minerais comportant plus de 60 % de supra 2 mm peuvent résister à la liquéfaction même si la fraction fine présente une consistance boueuse.

A part les minerais STC4 et SPC2, qui sont excentrés par rapport à la courbe de tendance, l'ensemble des minerais s'aligne correctement sur la courbe de tendance. Nous pouvons par conséquent retrouver une formule qui permet de prédire l'humidité critique des fines à partir du pourcentage des grenus et de la limite de liquidité des fines.

Cette formule s'écrit sous la forme $H_2O_{crit.fine} = WL (6E-5 * (fgr)^2 + 8E-4*fgr+0.775)$. Le coefficient de corrélation correspondant $R^2 = 0.75$; avec WL : limite de liquidité en % et fgr : pourcentage massique des grenus en %.

Cette formulation montre que pour les minerais dépourvus de grenus (supra 2 mm), la liquéfaction se produit lorsque l'humidité devient proche de 0.8 WL (exprimé en % du poids total). Ainsi, nous retrouvons le critère qui est recommandé dans les études parasismiques pour évaluer le risque de liquéfaction des sols limoneux. Ce critère considère que les sols limoneux, caractérisés par des infra $80 \mu m > 20\%$ et un $I_p > 12\%$, sont liquéfiables dès lors que leur teneur en eau dépasse 0.8 WL (Seed et al 2003) ; CF. Figure 22. Seuls les saprolites de laverie SL2, qui présentent un rapport de 0.73, ne satisfont pas tout à fait ce critère.



Dans le cas du SMC3, l'essai cyclique a été réalisé sur la fraction <2mm

Figure 22: Corrélation entre la limite de liquidité et l'humidité critique des fines
(Cas des minerais fins)

Nous rappelons que les minerais argileux présentent une forte limite de liquidité. La proportionnalité entre l'humidité critique dans les fines et la limite de liquidité reflète ainsi l'influence de l'argilosité des minerais sur la liquéfaction. Les minerais les plus argileux présentent une plus faible sensibilité à la liquéfaction.

3.4.2.8. *Sensibilité des minerais à l'humidification*

Les minerais de nickel présentent une humidité naturelle variable mais dans la plus part des cas nettement plus faible que la limite de liquéfaction. Ils subissent une humidification par la pluie en cours d'exploitation ou en cours de stockage. En considérant les résultats de l'analyse précédente et notamment l'importance de l'humidité des fines sur la liquéfaction, nous estimons que :

- Les minerais fins comportant plus de 70 % d'infra 2 mm sont moins sensibles à l'humidification. En effet, la quantité d'eau supplémentaire apportée par les pluies sera quasiment répartie sur le poids total du minerai (fraction fine majoritaire), et ne provoque pas une modification significative de l'humidité (moins 1 pt d'humidité).
- Les minerais grenus comportant une faible proportion de fines (moins de 30%), sont très sensibles à l'humidification. En effet, la quantité d'eau supplémentaire apportée par les pluies se concentre dans les fines qui ne représentent que le tiers du poids total du minerai. La modification de l'humidité des fines peut être importante (plus de 3 pt d'humidité) et provoque ainsi une augmentation des risques de liquéfaction.

3.4.2.9. *Critère de transportabilité des minerais de nickel*

L'humidité critique d'un minerai, vis-à-vis de la liquéfaction au cours du transport par voie maritime, dépend de deux paramètres essentiels : la plasticité de la fraction fine exprimée par la limite de liquidité et le pourcentage des grenus supra 2 mm contenus dans le minerai.

L'analyse statistique du paragraphe 3.2 montre que les minerais ne sont pas homogènes même au sein d'un même groupe ; l'écart peut atteindre 5 pts d'humidité sur la limite de liquidité et peut atteindre jusqu'à 40% sur le pourcentage des grenus.

Compte tenu de cette variabilité, il n'est pas possible de définir une humidité critique spécifique à chaque minerai. Pour le contrôle de la transportabilité du minerai, un essai systématique doit être réalisé sur les différents lots de minerais qui seront destinés au chargement.

L'essai doit satisfaire les deux conditions essentielles, à savoir : la prise en compte de la fraction grenue (2 à 30 mm) et la simulation de la plasticité des fines.

Parmi les essais de contrôle proposés dans le recueil du BC Code, l'essai de la table vibrante à pointe (TVP) est le plus approprié au minerai de nickel et ce pour les raisons suivantes :

- Taille du dispositif de l'essai qui permet de rentrer raisonnablement des fractions granulométriques proches de 25 mm.
- Le principe de l'essai de la table vibrante à pointe est similaire à l'essai au pénétromètre à cône. Ce dernier est un essai normalisé pour la mesure de la limite de liquidité.

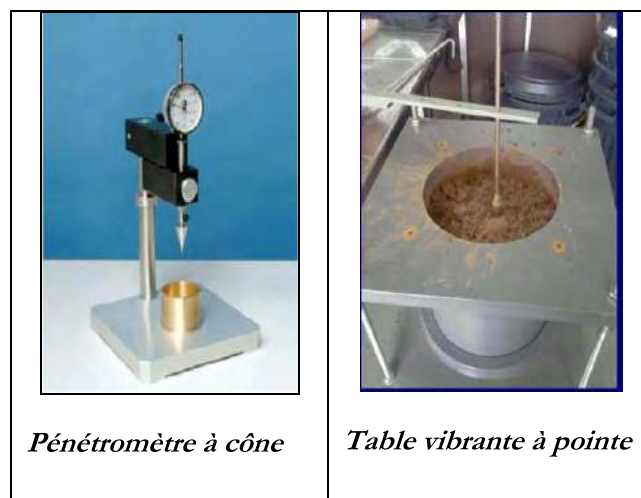


Figure 23: *Similitude entre l'essai TVP et le pénétromètre à cône*

3.5. Conclusion

Vis-à-vis de la liquéfaction, les minerais de nickel peuvent être classés en 3 groupes : les latérites, les saprolites terreuses et les saprolites grenues. Bien que les trois groupes soient bien distingués, la variabilité intrinsèque au sein d'un groupe reste significative.

L'étude rhéologique a montré que la fraction infra 63 μm présente le même comportement rhéologique pour les différents minerais des trois groupes. Cette fraction semble stabilisante vis-à-vis de la liquéfaction à cause de l'anisotropie des grains solides qui améliore à la fois le frottement et augmente la rétention (35 à 40 %). Les particules sableuses tendent à augmenter la fluidité et à réduire la résistance au cisaillement du matériau. Ainsi, les minerais latéritiques, comportant une forte proportion d'infra 64 μm (près de 90%), présentent une meilleure résistance à la liquéfaction que les saprolites grenus qui comportent une forte proportion de sable (plus de 50 % dans la fraction <2 mm).

Les minerais humides subissent un ramollissement sous l'effet des vibrations. Pour une énergie de vibration fixe, il est possible de définir une humidité critique en dessous de laquelle les minerais ne subissent pas de ramollissement.

Les essais de cisaillement monotone ont montré que les latérites présentent un comportement frottant et contractant qui serait moins favorable vis-à-vis de la liquéfaction que les saprolites terreuses qui sont dilatantes et présentent une cohésion plus élevée à cause de leur forte argilosité.

Les essais de cisaillement cyclique ont permis de déterminer une humidité critique produisant la liquéfaction et spécifique à chaque prélèvement de minerai, et ce pour un taux de cisaillement fixé à 0.3 (gite de + /- 15°). L'humidité critique est de 35 à 40 %, pour les minerais fins du groupe 1 et 2, et de 24 à 30%, pour les minerais grenus.

Les essais à la table à secousses proposés dans le recueil du BC code ne sont pas adaptés pour l'ensemble des minerais de nickel car ils sous-estiment le risque de liquéfaction pour les minerais argileux et pour les minerais grenus. Ces deux types de minerais sont assez fréquents dans les mines de nickel en Nouvelle Calédonie.

La liquéfaction se produit dans la fraction fine infra 2 mm. La présence de la fraction grenue supra 2 mm améliore la résistance au cisaillement du minerai. Cette amélioration devient remarquable au-delà de 60% de grenus.

En se fixant une humidité moyenne dans les grenus, nous avons proposé une formule expérimentale qui permet de prédire l'humidité critique dans les fines en fonction du pourcentage des grenus et de la limite de liquidité des fines (infra 0.4 mm).

Les minerais grenus comportant moins de 40% de fines sont plus sensibles aux changements d'état hydrique notamment sous l'effet des pluies.

A défaut d'une formule fiable qui permet de prédire l'humidité critique du minerai (limite de transportabilité) et compte tenu de l'hétérogénéité du minerai de nickel, il est indispensable de réaliser des essais de contrôle pour différents lots de minerais avant le chargement.

4. ELABORATION D'UN ESSAI DE CONTRÔLE

Pour l'élaboration de l'essai de contrôle, notre attention a été portée sur les différents essais recommandés dans le recueil du BC code et particulièrement l'essai de la table vibrante à pointe qui satisfait les deux conditions essentielles définies dans le § 3.4.2.9, à savoir : la prise en compte de la fraction grenue (2 à 30 mm) et la simulation de la plasticité des fines.

Nous avons en première étape réalisé des tests préliminaires pour l'évaluation de la capacité du dispositif à reproduire les phénomènes de liquéfaction, puis nous avons procédé à l'adaptation du dispositif et du mode opératoire pour le minerai de nickel.

4.1. Evaluation de l'essai de la table vibrante à pointe

Nous avons comparé les résultats de trois types d'essais à savoir le flow test, la table vibrante à pointe «TVP» et les essais de cisaillement cycliques sur trois minerais différents.

Ces résultats montrent que :

- Dans l'essai de la table vibrante à pointe, l'évolution de la courbe de poinçonnement en fonction de l'humidité permet de définir l'humidité correspondant à la perte de cohésion (passage à l'état liquide), qui se caractérise par une augmentation remarquable de la pénétration de la pointe. Cette humidité critique est très liée à la coupure granulométrique de l'échantillon introduit dans le dispositif et à la valeur de la contrainte exercée par la pointe.
- Les essais cycliques, que nous considérons comme référence, sont plus conservateurs que les essais TVP et flow test ; CF. Figure 20. Dans le cas des minerais argileux, l'écart entre les humidités critiques déterminées par les essais cycliques et celles déterminées par la TVP peut s'élever à 7 points ; CF. Figure 24.

Ainsi, nous avons estimé que moyennant des adaptations, l'essai à la table vibrante à pointe peut constituer un essai fiable pour le contrôle de la transportabilité des minerais de nickel.

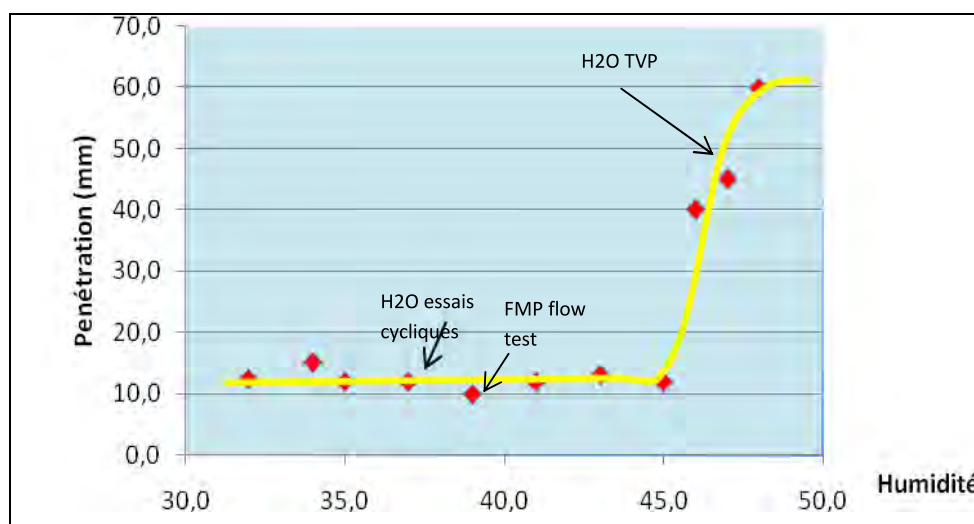


Figure 24: *Essais à la table vibrante à pointe sans modifications*
(Saprolites de laverie MB SL2)

4.2. Mise au point du protocole de l'essai

Les modifications ont concerné le protocole d'exécution des essais et la pointe de poinçonnement. Ces essais ont été réalisés sur un minerai grenu SMC4 contenant 55% de grenus (supra 2mm).

Au cours de ces essais, nous avons comparé trois modes opératoires :

Mode 1 : Procédure et pointe proposée dans le BC code (diamètre 15 mm, contrainte verticale sous la pointe 10 KPa, pénétration critique 50 mm).

Mode 2 : Procédure du BC code et pointe modifiée (diam 20 mm, ajout de deux masselottes induisant une contrainte verticale sous la pointe de 54 KPa, pénétration critique 80 mm).

Mode 3 : Pointe modifiée, mise en place d'un disque de confinement de surface (1.7 KPa de compression) et nouveau protocole (4 min de vibration sans pointe + 6 min de vibration avec pointe, pénétration critique 80 mm).

Nous rappelons que l'humidité critique correspondant à la liquéfaction de ce minerai au cours de l'essai de cisaillement cyclique est proche de 28%.

Les courbes d'évolution de la pénétration de la pointe en fonction de l'humidité donnent une humidité critique de 29% pour le mode 1 et une humidité de 28% pour les modes 2 et 3; CF. Figure 25.

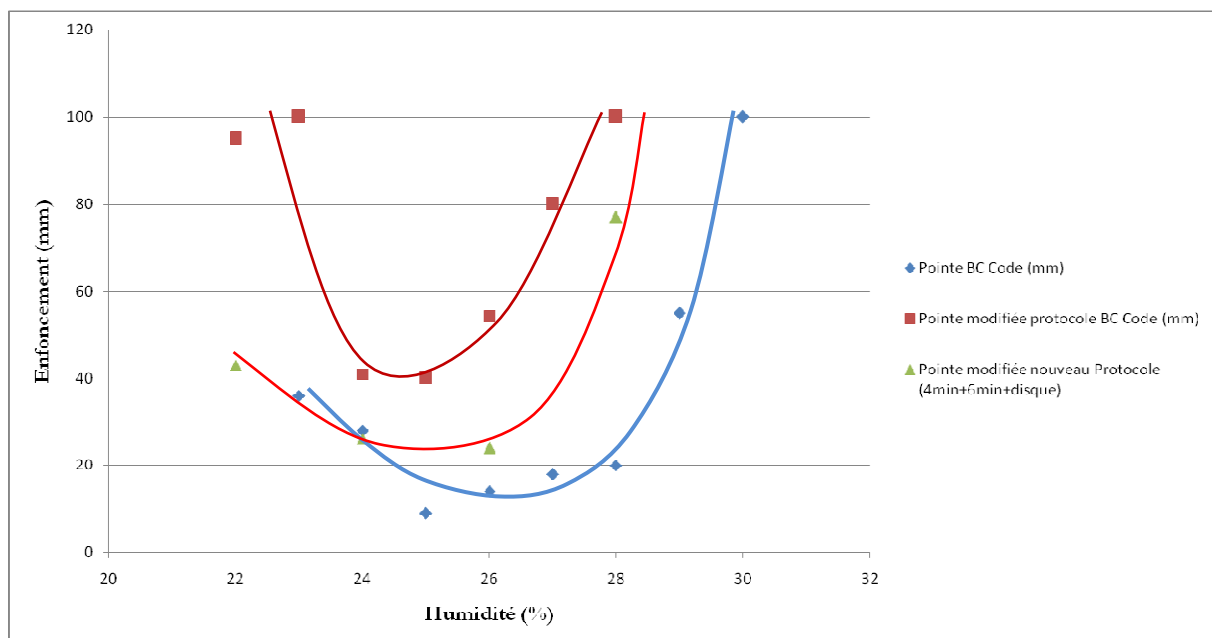


Figure 25 : *Enfoncement de la pointe en fonction de l'humidité totale du minerai (Echantillon SMC4)*

Pour les faibles humidités (loin de la limite de liquéfaction), le mode 2, donne des pénétrations de près de 100 mm qui sont de même ordre de grandeur que la pénétration critique fixée à 80 mm. Ce biais est lié à une compaction dynamique sous la pointe pendant les premières minutes de vibration.

Le mode 3, permet clairement de limiter l'effet de compaction dynamique sous la pointe et ce pour les faibles humidités. Il ressort par ailleurs que ce mode n'affecte pas la valeur de l'humidité critique qui est quasiment la même pour les modes 2 et 3.

C'est ainsi que nous avons retenu le mode 3 comme nouveau protocole de l'essai à la TVP.

Pour ce nouveau protocole (mode 3), nous vérifions que le cisaillement mobilisé sous la pointe est proche de 16 KPa, soit 5 fois plus que le cisaillement mobilisé sous la pointe normalisée (BC Code).

4.3. Vérification du nouveau protocole sur les minerais fins

Pour vérifier l'adaptation du nouveau protocole sur les minerais fins, nous avons réalisé une première série d'essais sur les latérites de Poro L1 ; CF. Figure 26.

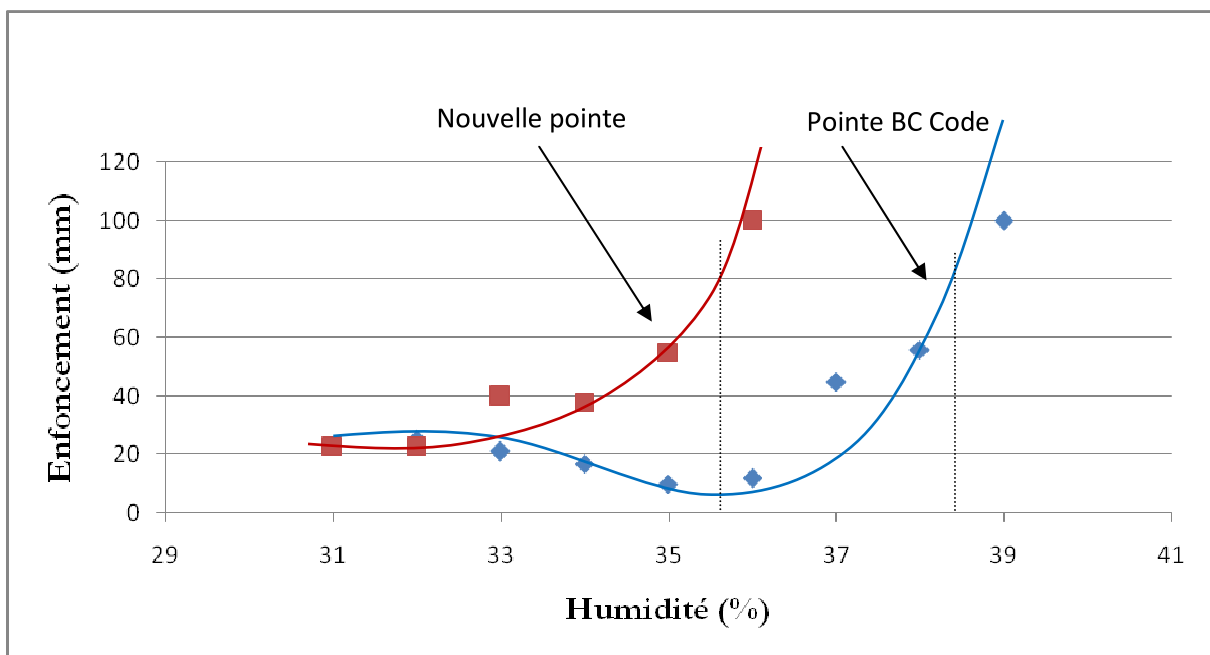


Figure 26: Evolution de la valeur de la pénétration de la pointe en fonction de l'humidité totale du minerai (latérites de Poro L1)

Nous constatons que l'application de la pointe BC code (10 KPa), donne une humidité critique proche de 38%, soit 3 points d'humidité de plus que l'humidité critique déduite des essais cycliques qui donnent une valeur de 35.1%.

L'application de la nouvelle pointe (54 KPa), qui mobilise un cisaillement sous la pointe proche du cisaillement imposé dans l'essai cyclique, permet de retrouver une humidité critique de 35.5 %.

Afin de vérifier la sensibilité de l'essai TVP à l'effort de cisaillement mobilisé sur la pointe, nous avons déterminé les valeurs des humidités critiques pour différentes valeurs de cisaillement mobilisé sous la pointe ; CF. Tableau 12.

Tableau 12: Valeurs des humidités critiques pour différents cisaillements mobilisés sous la pointe (latérites de Poro L1)

Nb de masselottes	Cisaillement mobilisé sous la pointe (KPa)	H2O critique %
0	3	38
1	10	37
2	16	35.5
3	23	34

Il en ressort que la sensibilité de l'humidité critique à la valeur du cisaillement mobilisé sous la pointe peut être estimée à une perte de 0.25 points d'humidité pour une augmentation de 1KPa du cisaillement mobilisé.

La deuxième série de vérification a été réalisée sur un minéral fin très argileux (SL2 Sapolites de laverie MB) ; CF. Figure 27.

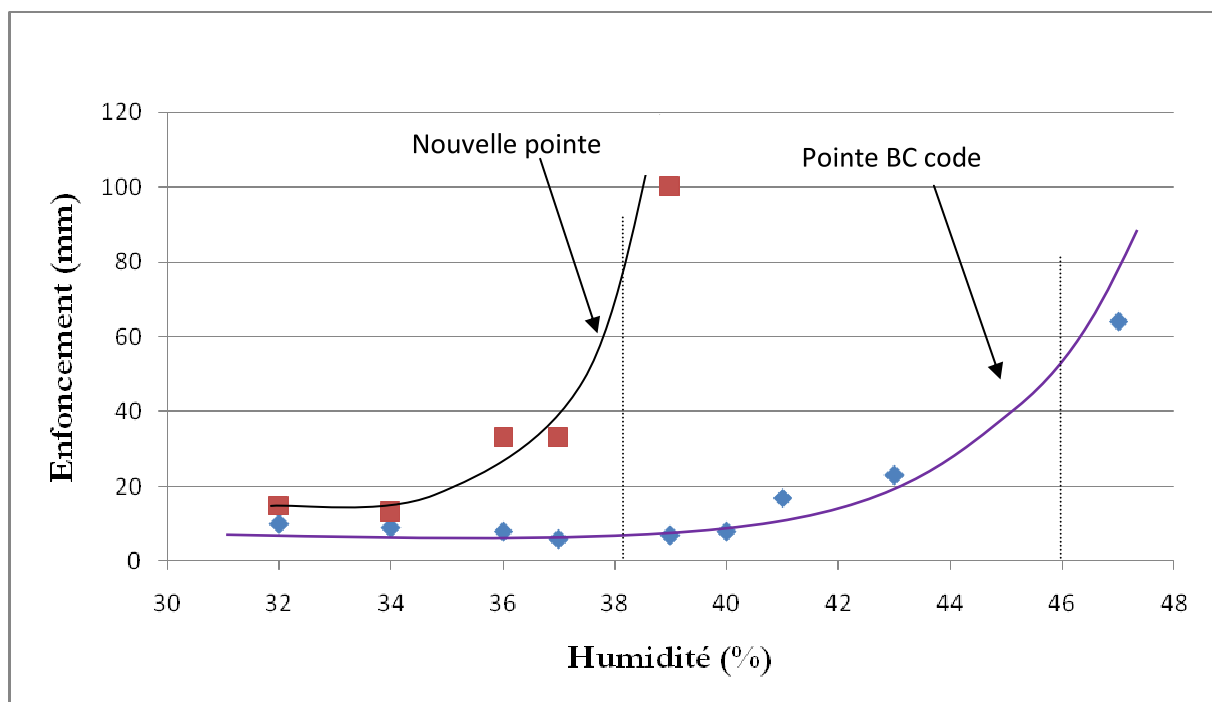


Figure 27: Evolution de la pénétration de la pointe en fonction de l'humidité totale du minéral (Sapolites de laverie MB SL2)

Pour ce minerai, nous constatons que l'écart entre l'humidité critique déduite des essais cycliques et celle déduite de l'essai TVP, réalisé selon le protocole du BC Code, s'élève à près de 8 pts d'humidité. L'application du nouveau protocole TVP permet de réduire cet écart à moins de 0.5 pt d'humidité.

Comme le minerai est très argileux, nous avons analysé l'effet de la durée des vibrations sur la pénétration de la pointe pour trois valeurs proches de l'humidité critique estimée à 38% ; CF. Figure 28.

Nous constatons que :

- Pour une humidité de 37 %, inférieure à l'humidité critique, la pénétration de la pointe se stabilise à une valeur proche de 50 mm, après une durée de vibration de l'ordre de 10 min.
- Lorsque le minerai est à son humidité critique, la pénétration de la pointe ne se stabilise pas et atteint sa valeur critique fixée à 80 mm, après une durée de l'ordre de 10 min.
- Pour des humidités supérieures à l'humidité critique, la pénétration de la pointe devient rapide et dépasse la valeur critique après moins de 4 min de vibration.

Ces essais montrent que le nouveau protocole est aussi bien adapté pour les minerais argileux qui se caractérisent par le développement de fortes déformations plastiques à l'approche de la rupture ; CF. Figure 28.

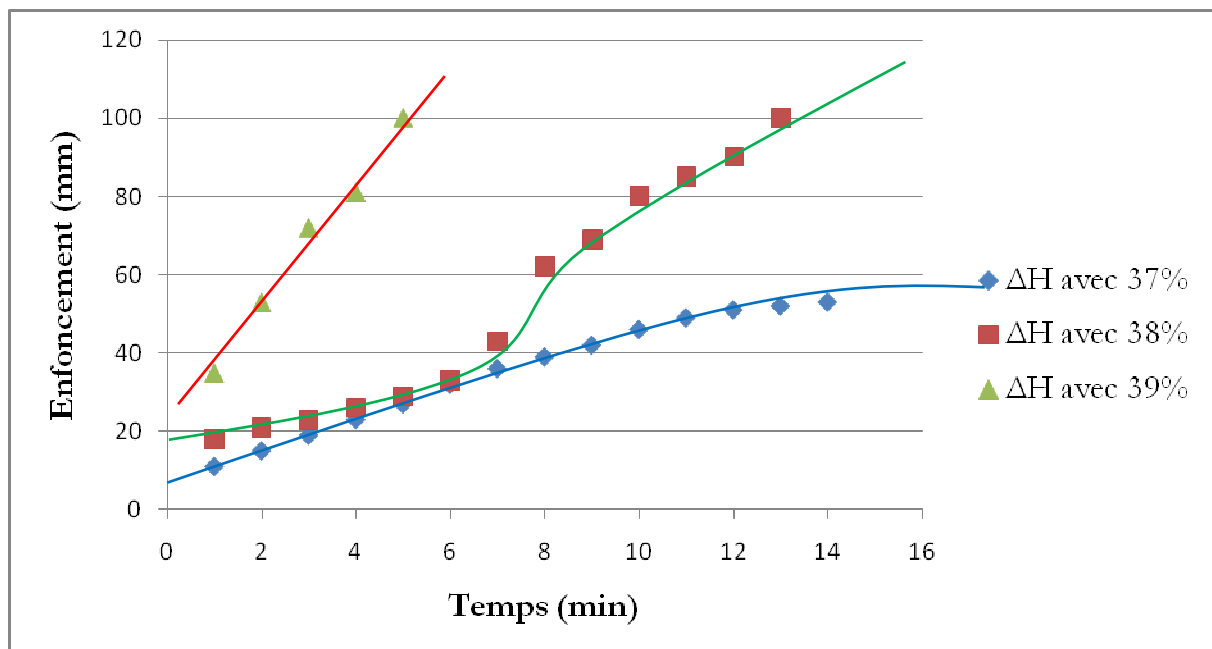


Figure 28: Pénétration de la pointe en fonction du temps pour différentes humidités

(Saprolites de laverie MB SL2)

4.4. Vérification de la validité du nouveau protocole pour l'ensemble des minerais

Afin de vérifier la fiabilité du nouveau protocole, nous avons réalisé l'essai TVP selon le nouveau protocole, pour tous les échantillons des minerais étudiés dans le cadre du projet Rhéolat. Cette vérification a été réalisée en considérant les résultats des essais de cisaillement cyclique comme référence.

La synthèse des essais, présentée dans le tableau 13, montre que la moyenne du rapport de l'humidité critique « TVP » sur l'humidité « essais cycliques » est de 0.998 avec un écart type de 0.04. En considérant l'hétérogénéité du minerai et les différences qui peuvent exister entre les différents prélèvements, nous estimons que le calage est très satisfaisant.

Tableau 13: *Comparaison entre les résultats des essais TVP modifiée et des essais de cisaillement cyclique*

Echantillon	Supra 2 mm % dans les infra 30	VBS	WL (H2O)	H2O totale critique (essais cycliques)	H2O totale critique TVP	H2O des fines (cycliques)
L1	0.2	0.1	43.5	35.1	36	35.14
B2	6	0.7	39.76	30		31.16
SL2	0.8	7.8	51.22	37.5	38	37.67
SPC1	50	1,03	38.27	24	25	36.77
SPC2	33	0,67	39.39	29	28	36.91
SPCA1	27	7.1	51.46	37.1		44.12
SPC4	18	6,67	50.74	35.9		40.19
SMC1	43	3,09	42.2	25	25	35.36
SMC3	45	0,61	40.12	25	24	36.11
SMC3	60	0.61	40.12	25	23	43.13
SMC4	35	1,4	36.31	24	24.5	33.20
STC4	34	1,23	34.21	25	26	32.40

Les figures 29 à 31 donnent des exemples de courbes d'évolution de la pénétration de la pointe au fur et à mesure de l'augmentation de l'humidité. Ces courbes comportent deux phases bien marquées :

- La première phase est relative aux faibles humidités et dans de laquelle la pénétration de la pointe est peu sensible à l'humidité et varie entre 20 et 40 mm. Cette phase correspond à des minerais non saturés qui sont peu affectés par les vibrations et qui présentent une résistance mécanique plus élevée que la sollicitation induite par la pointe (cisaillement non drainé proche de 16 KPa). Ainsi, pour ces faibles humidités, nous considérons que le minerai possède une cohésion non drainée minimale de 16 KPa.
- La deuxième phase est relative aux fortes humidités et dans laquelle la pénétration de la pointe devient très sensible à l'augmentation de l'humidité. Autrement dit, sous l'effet des vibrations, la cohésion non drainée du minerai chute et devient nettement plus faible que le cisaillement induit par la pointe. Nous constatons que le passage de la première phase à la deuxième est assez brutal.

NB : La pénétration maximale de la pointe est limitée à 100 mm par le dispositif et par conséquent, nous considérons que le déplacement peut dépasser réellement 100 mm.

Par ailleurs, nous tenons à signaler que vu l'importance de l'effort induit par la pointe, le seuil de rupture ne correspond plus à une liquéfaction avec la transformation du matériau d'un état solide à un état liquide, mais correspond à une résistance mécanique minimale requise pour que le minerai puisse résister aux cisaillements cycliques induits par les divers mouvements du minéralier.

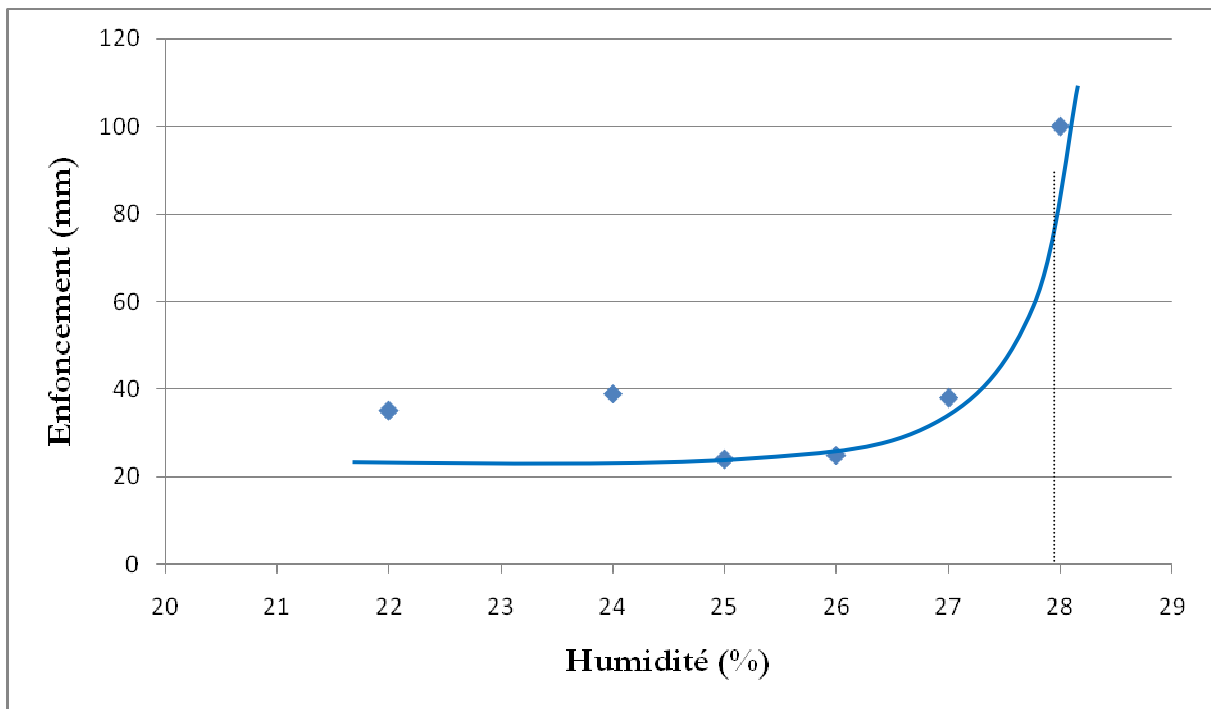


Figure 29: Evolution de la pénétration de la pointe en fonction de l'humidité totale du minerai (SPC2)

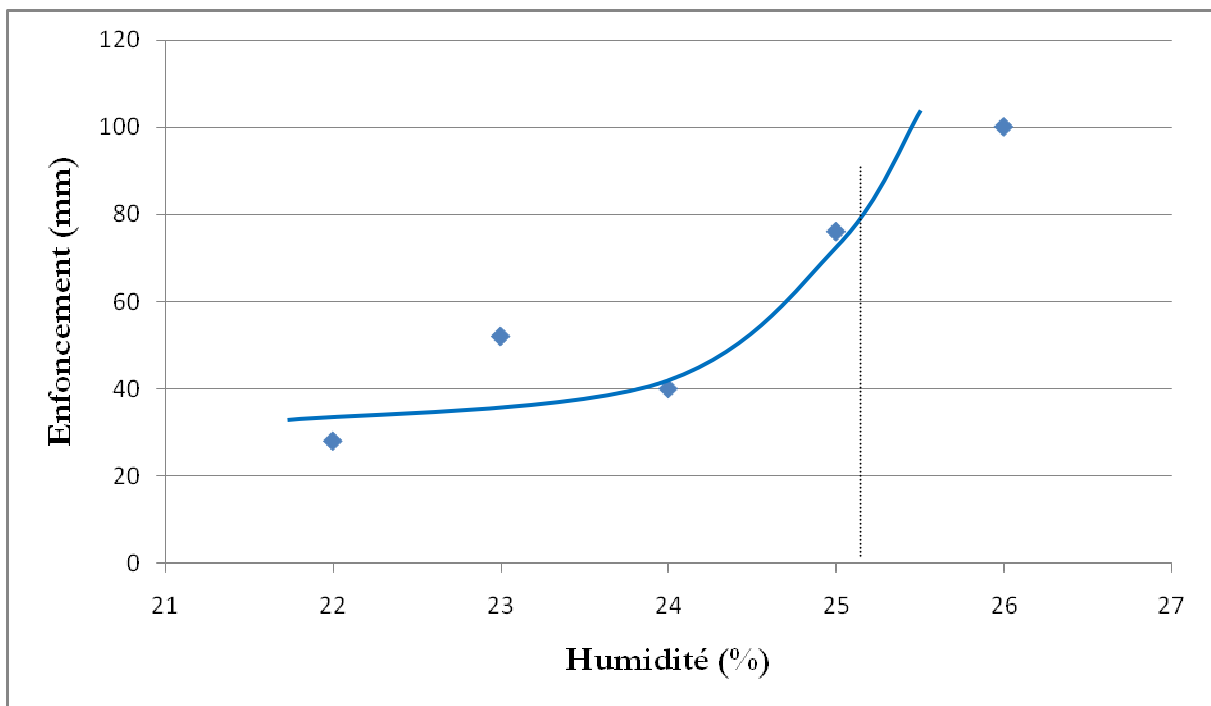


Figure 30: Evolution de la pénétration de la pointe en fonction de l'humidité totale du minerai (SMC1)

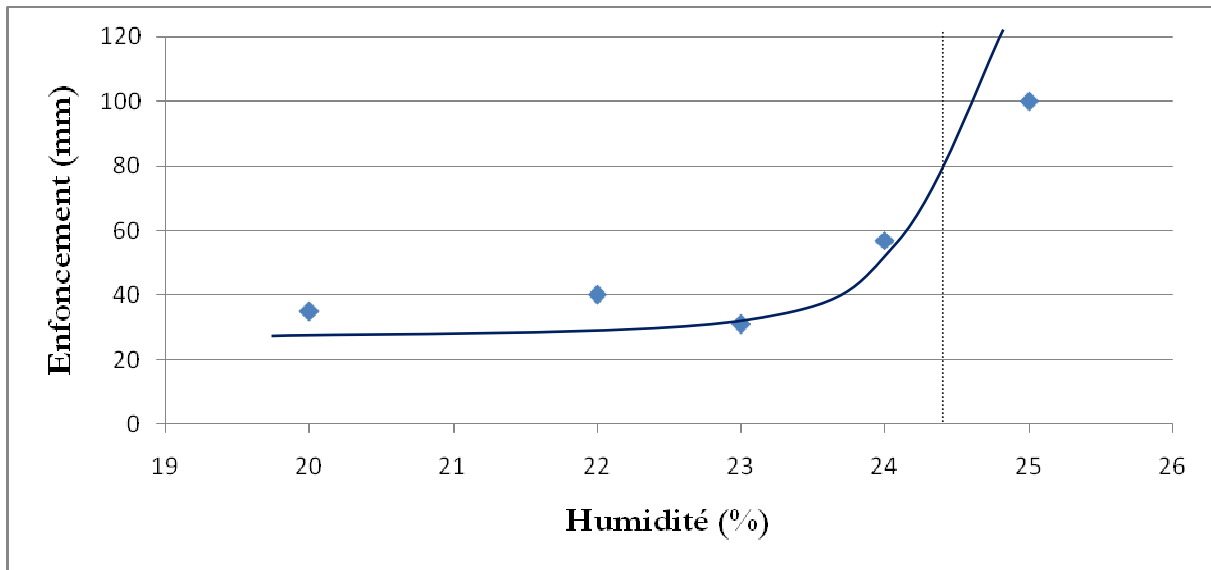


Figure 31: Evolution de la pénétration de la pointe en fonction de l'humidité totale du minéral (SMC4)

4.5. Vérification de la répétabilité de l'essai TVP selon le nouveau protocole

Pour ce faire, nous avons réalisé 5 essais TVP avec le nouveau protocole sur 5 échantillons de minéral provenant d'un même prélèvement. Les essais ont été réalisés sur trois minerais représentatifs des trois groupes de minerais.

Les résultats des mesures montrent que l'écart type entre les différentes mesures est faible (0.3 à 0.6) ; CF. Tableau 14.

L'écart absolu est limité à 0.5 pt d'humidité pour le groupe 1, mais s'élève exceptionnellement à 0.8 pt pour les minerais argileux. En effet, pour ces matériaux, nous avons constaté un changement de l'état du matériau avec le temps d'imbibition et ce à cause du gonflement qu'il subit. Ce gonflement a tendance à accroître la valeur de l'humidité critique, ce qui va dans le sens de la sécurité.

Tableau 14: Analyse de la répétabilité des essais TVP modifiée

Essai	H2O% (Obtenu par différence de masse après séchage)		
	L1 (groupe 1)	SPC4 (groupe 2)	SMC3 (groupe 3 en cours)
1	38.5	40.3	26.5
2	38.7	40.6	26.6
3	38.2	41.7	25.6
4	38.4	41.1	25.4
5	39.0	41.8	26.60
Moyenne	38.6	41.1	26.2
Ecart type	0.3	0.6	0.5

4.6. Analyse de l'influence des grenus sur la liquéfaction à partir des essais TVP modifiée.

4.6.1. Influence du pourcentage des grenus

Afin de confirmer la contribution de la fraction de grenus dans l'amélioration de la résistance à la liquéfaction du minerai, nous avons réalisé une analyse à partir des essais TVP sur deux minerais qui se ressemblent (SMC3 et SMC4) en faisant varier le pourcentage des grenus par pas de 10 % ; CF. Figure 32.

Nous constatons que l'humidité totale critique, est inversement proportionnelle avec le pourcentage des grenus. L'humidité totale critique diminue de 1.5 pts pour une augmentation de la fraction des grenus de 10 %. Au-delà de 60% de grenus, l'humidité totale critique se stabilise à une valeur proche de 22% qui correspond à la saturation totale du minerai.

Les deux courbes correspondant aux deux minerais SMC4 et SMC3 sont très proches. Nous pensons que cette ressemblance s'explique par le fait que ces deux minerais comportent des fines qui présentent des limites de liquidité très proches (36% pour le SMC4 et 40% pour le SMC3).

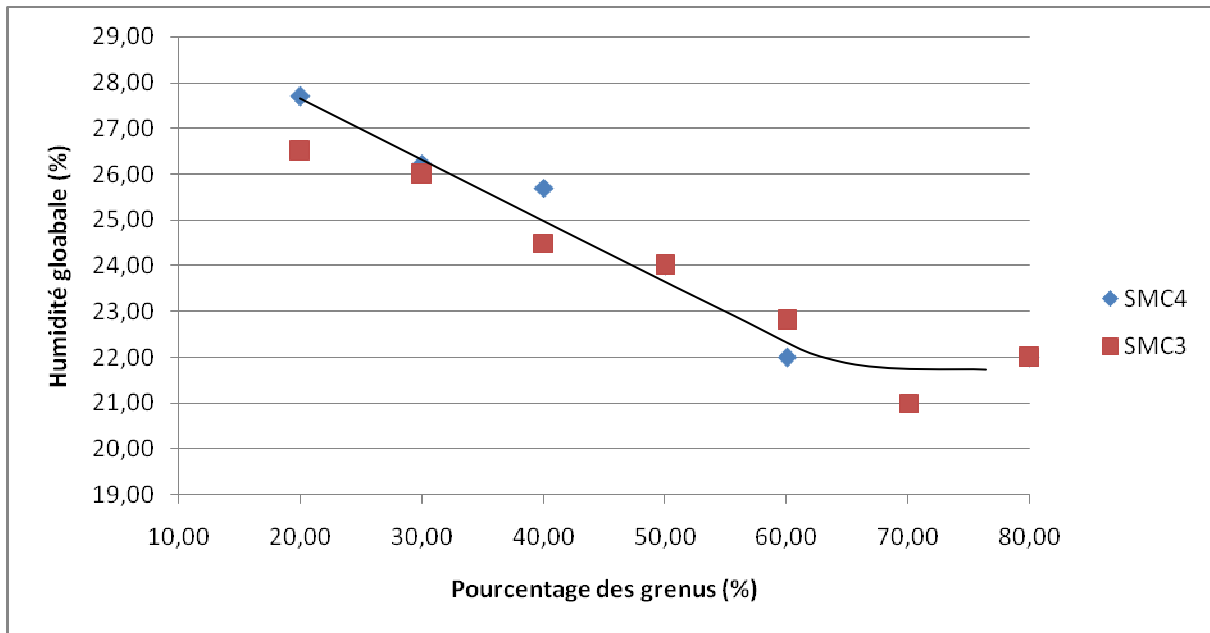


Figure 32: Humidité globale du minerai au moment de la liquéfaction en fonction du pourcentage des grenus (essais TVP modifiée)

Comme nous l'avons indiqué dans le § 3.4.2.7, l'analyse de l'influence des grenus sur la résistance au cisaillement cyclique ne peut pas se faire directement à partir de l'humidité totale critique déduite des essais cycliques. En effet, vu leur faible rétention d'eau, les grenus tendent à réduire l'humidité totale du minerai mais améliorent la résistance au cisaillement cyclique.

Pour ce faire, nous avons focalisé l'analyse sur l'humidité des fines (<2 mm) en supposant que les grenus (>2 mm), améliorent normalement la résistance au cisaillement cyclique.

Ainsi, pour chaque échantillon, nous avons calculé l'humidité des fines au moment de la liquéfaction à partir de l'humidité totale critique et ce en considérant une rétention d'eau dans les grenus de 5% (NB : ce taux de rétention correspond à des conditions particulières au moment des essais ; cailloux sec).

Nous supposons que la fraction fine se transforme normalement à un état liquide lorsqu'elle est remaniée et que son humidité dépasse la limite de liquidité (exprimée en humidité).

Nous avons établi une courbe de tendance du rapport (humidité des fines/ limite de liquidité) en fonction de l'augmentation du pourcentage des grenus (>2 mm). CF. Figure 33.

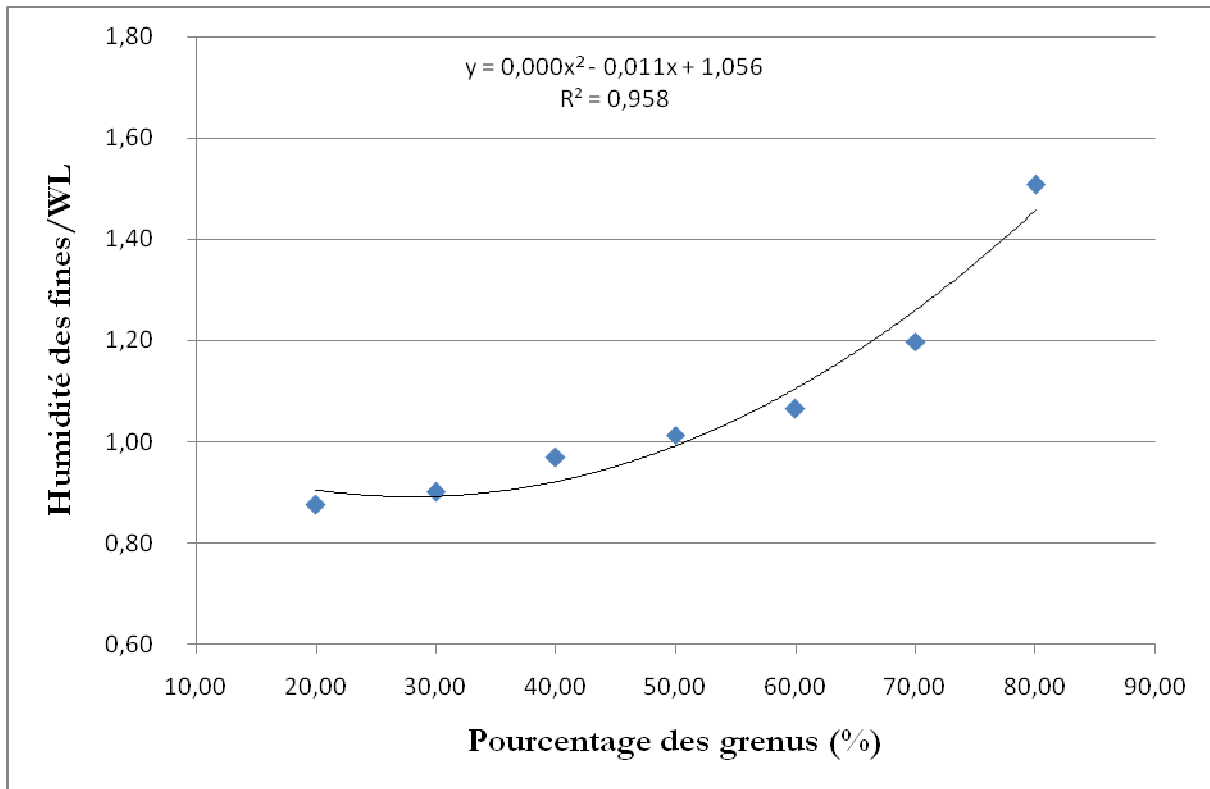


Figure 33: Humidité des fines au moment de la liquéfaction en fonction du pourcentage des grenus (minéral SMC4 essais TVP)

La courbe d'évolution de l'humidité critique des fines, au moment de la liquéfaction en fonction du pourcentage des grenus, peut être ajustée par une fonction polynomiale du deuxième d'ordre 2 qui s'écrit sous la forme $H_{2O_{critfine}} = WL (2E-4 * (fgr)^2 - 1.2E-2 * fgr + 1.06)$. Le coefficient de corrélation correspondant $R^2 = 0.96$; Avec WL : limite de liquidité en % ; fgr : pourcentage massique des grenus en %.

Comparée à la formule présentée dans le §. 3.4.2.7, nous constatons une nette amélioration du coefficient de corrélation qui peut être imputée à l'homogénéité des fines utilisées dans ces essais.

L'analyse de la courbe d'évolution présentée dans la figure 33 montre deux tendances :

- La première, correspondant au faible pourcentage des grenus (<60%), avec une augmentation de 1.6 pt d'humidité dans les fines pour un accroissement de 10% de grenus. L'humidité des fines varie de 30 à 35 % et reste globalement sous la limite de liquidité (proche de 37%).
- La deuxième, correspondant au fort pourcentage des grenus, avec une augmentation de 8.5 pts d'humidité des fines pour un accroissement de 10% de grenus. Dans ces conditions, les grenus forment une structure granulaire

relativement stable, la destruction de cette structure ne peut se produire qu'avec des fines qui soient extrêmement humides (état boueux).

Ces résultats montrent que les grenus (supra 2 mm), constituent des éléments stabilisateurs vis-à-vis de la liquéfaction, notamment lorsque leur proportion dépasse 60%. Ainsi, la réaliser l'essai TVP sur une coupure à 30 mm, donnera un résultat assez pénalisant dans le cas des minerais du groupe 3 qui comportent une proportion de supra 30 mm de l'ordre de 25%, qui peut atteindre 50% dans le cas des minerais réputés caillouteux.

Afin d'avoir des essais TVP représentatifs du comportement du minerai, il est indispensable d'évaluer systématiquement le pourcentage des supra 30 mm et d'en tenir compte pour la définition du critère de transportabilité.

4.6.2. Influence de la taille des grenus

Le but de cette analyse consiste à démontrer que la taille des grenus n'a pas d'effet sur le potentiel de liquéfaction des minerais et qu'il est ainsi possible de substituer dans l'essai TVP, les supra 30 mm par des grenus (20 – 30 mm).

Pour ce faire, nous avons réalisé des essais sur des échantillons reconstitués du minerai SMC4, en modifiant pour chaque essai le diamètre des grenus tout en fixant la proportion des grenus à 50%.

Pour chaque échantillon reconstitué, nous avons fait varier l'humidité jusqu'à l'obtention de l'humidité critique qui correspond à une pénétration de la pointe de 80 mm ; CF. Tableau 15.

Tableau 15 : Effet de la taille des grenus sur l'humidité critique

Diamètre des grenus (mm)	H2O critique (%)
10-20	23.9
20-30	23.8
2-5	24.85
5-10	24.88

Les résultats des essais montrent que globalement, la taille des grenus a très peu d'effet sur la résistance au cisaillement cyclique du minerai.

Nous constatons néanmoins une petite différence de 1 pt sur l'humidité critique entre les grenus inférieurs à 10 mm et les grenus supérieurs à 10 mm.

Cette différence peut s'expliquer par la variation du niveau de rétention des grenus en fonctions de leurs tailles.

Comme l'humidité critique est quasiment la même entre 10-20 mm et 20-30 mm, nous considérons que la substitution des grenus supra 30 mm par des grenus 20 -30 mm est acceptable.

4.6.3. Prise en compte de la fraction supra 30 mm dans l'essai TVP

Selon le nouveau protocole proposé, l'essai TVP modifié est réalisé sur des échantillons de minerais dépourvus des supra 30 mm. Pour les minerais grenus qui comportent une fraction de grenus importante, il est indispensable de prendre en considération la fraction des grenus supérieure à 30 mm. Pour ce faire, nous proposons de réaliser les essais sur des échantillons de minerais reconstitués en substituant la fraction supra 30 mm par des grenus normalisés (20-30 mm).

5. EVALUATION DE LA MARGE DE SECURITE

La marge de sécurité concerne l'ensemble de la procédure qui permet de juger la transportabilité de l'ensemble de la cargaison, soit un stock de minerai de 20 000 à 50 000 tonnes selon la taille du minéralier.

Cette procédure comporte 3 étapes :

- Le prélèvement du minerai en cours du stockage en bord de mer
- La réalisation des essais TVP
- Le chargement du minerai dans les différentes cales du navire

Pour l'évaluation de la marge de sécurité, nous allons analyser les aléas pouvant induire des erreurs sur le jugement de la transportabilité du minerai et ce à chaque étape de la procédure.

Ensuite, nous allons essayer d'analyser l'effet d'échelle, en passant des conditions de liquéfaction de l'éprouvette (décimétrique) aux conditions de liquéfaction à l'échelle de la cale.

5.1. Le prélèvement et la préparation des échantillons

Chaque lot de 5000 tonnes de minerai sera représenté par 5 prélèvements de 200 kg qui seront homogénéisés en un échantillon de 50 kg dépourvu des supra 30 mm. Dans le cas des minerais des groupes 1 et 2, les essais TVP se feront directement sur du minerai prélevé dans les 50 kg. Dans le cas du groupe 3, l'échantillon de 50 kg doit faire l'objet

d'une reconstitution granulométrique. Pour ce faire, il est nécessaire de déterminer pour chaque lot de minerai, le pourcentage des supra 30 mm.

Dans cette préparation, les principaux aléas concernent la détermination du pourcentage des grenus dans le minerai brut et la perte d'humidité au cours des manipulations.

Pour le premier aléa, en se basant sur la sensibilité des résultats de l'essai TVP par rapport au pourcentage des grenus, nous estimons qu'une erreur relative de +/-10 % sur la valeur calculée n'induirait pas de changement significatif sur les résultats de l'essai TVP. La réalisation du criblage à l'eau permettrait d'éviter une surestimation du pourcentage des grenus dans le minerai brut.

Pour le deuxième aléa qui concerne la perte d'humidité, un plan d'assurance qualité sera mis en place dans le but de réduire l'exposition de l'échantillon à l'air libre et ce, en travaillant sous abri et en conservant les échantillons prélevés dans des récipients étanches. ***Nous estimons que la perte d'humidité liée à cet aléa ne dépasserait pas 0.2 pt d'humidité.***

5.2. La réalisation des essais TVP

La marge de sécurité sur les essais TVP est définie à partir de la probabilité qu'un échantillon de minerai, donnant une pénétration de la pointe supérieure à 80 mm pendant l'essai TVP, se liquéfie pendant le transport. Plus la probabilité est faible, plus la marge de sécurité est forte. Comme l'humidité du minerai est le paramètre le plus influant sur la liquéfaction d'un minerai donné, la marge de sécurité peut être estimée sous forme d'une marge d'humidité (*Différence entre l'humidité de l'échantillon au moment de l'essai et l'humidité critique*).

Pour évaluer cette marge d'humidité, nous allons procéder à une analyse des différents aléas relatifs à la démarche suivie pour l'élaboration de l'essai.

5.2.1. Aléa relatif à la sollicitation induite par la houle

La houle produit deux effets,

- Des vibrations induites par les différents mouvements du minéralier qui peuvent provoquer la liquéfaction. Celle-ci se manifeste par une perte de cohésion apparente des minerais humides.
- Des mouvements de roulis qui peuvent induire des cisaillements importants notamment au niveau de la surface du minerai. Associé à la chute de la cohésion, les forts roulis peuvent déformer la surface du minerai et provoquer ainsi une modification défavorable du centre de gravité de la cargaison.

Ces deux effets couplés ont été simulés en laboratoire par un essai de cisaillement cyclique qui correspond à une gîte peu fréquente de 15°. Ces essais montrent que les minerais ne se liquéfient pas lorsque leur degré de saturation est inférieur à 85% et que l'augmentation de la gîte de 15 à 20° ne provoque pas la liquéfaction. ***Ainsi si le minerai est jugé non liquéfiable par l'essai, il peut résister à un roulis peu fréquent de +/- 15° sur l'ensemble du trajet et à un roulis exceptionnel de +/- 20° sur une partie du trajet.***

Par ailleurs, pour que la surface du minerai reste stable sous une gîte de 15°, la résistance au cisaillement résiduelle du minerai doit être au moins égale à 13 KPa. Dans la suite de la procédure, nous avons considéré une résistance requise pour le minerai de 16 KPa soit un facteur de sécurité de 1.2.

Dans l'essai de la TVP, ce facteur de sécurité peut se traduire par une marge minimale sur humidité de + 0.7 pt qui peut monter à + 1.4 pt pour les minerais argileux (*Différence entre les humidités critiques pour une pointe sous 2 masselottes et sous une seule masselotte*).

Cette marge d'humidité peut se traduire comme suit : Le minerai jugé transportable par l'essai TVP, peut résister à un cisaillement de 16KPa soit une gîte de 20° ou à une humidification supplémentaire minimale de 0.7 pt.

5.2.2. Aléa relatif à l'interprétation des essais cycliques

L'humidité critique au-delà de laquelle le minerai est considéré liquéfiable au cours du transport est déterminée à partir des essais cycliques par augmentation de l'humidité par pas de 1 pt d'humidité jusqu'à liquéfaction, l'humidité critique «H₂O critique» est la plus faible valeur de l'humidité provoquant la liquéfaction. ***Nous considérons ainsi que cette approche permet de couvrir les aléas liés au mode opératoire de l'essai cyclique.***

Nous rappelons que les conditions opératoires de l'essai cyclique offrent une bonne précision et que la répétabilité des essais cycliques a été démontrée.

5.2.3. Aléa relatif au calage de l'essai TVP sur l'essai cyclique

L'essai TVP a été calé en se basant sur les valeurs des humidités critiques définies par les essais cycliques pour chacun des 9 échantillons de minerais différents.

La comparaison des résultats des deux essais pour chaque minerai a donné un rapport moyen entre les deux résultats (H₂O TVP/H₂O essais cycliques) de 0.998 avec un écart type très faible 0.04. Ce résultat montre que globalement, l'essai TVP est légèrement plus sécuritaire que l'essai cyclique. Cependant, la précision du calage serait proche de 0.75 pt d'humidité.

5.2.4. Aléa relatif à la procédure de l'essai TVP

Cette procédure comporte la préparation des échantillons et la réalisation des essais TVP :

- La préparation des échantillons se fera sous abris, selon un plan d'assurance qualité rigoureux. La perte d'humidité dans les fines qui est la fraction la plus sensible à la liquéfaction ne dépassera pas 0.2 pt d'humidité, (pris en compte dans le § 5.1).
- D'après les résultats des essais de répétabilité sur différents minerais (5 essais réalisés sur des échantillons identiques d'un même minerai), la précision de l'essai serait de l'ordre de 0.5 pt d'humidité. Cette erreur, sera compensée par la répétition des essais de contrôle sur chaque lot (3 à 4 essais concluants).

Ainsi, en cumulant les précisions sur le calage et sur la préparation des échantillons, nous obtenons une précision globale de la procédure de l'essai de l'ordre 0.95 pt d'humidité.

5.3. Procédure de stockage et de chargement du minerai

La procédure proposée pour le contrôle de transportabilité des minerais est la suivante :

- Echantillonnage des différents lots de minerai au fur et à mesure de la mise en stock en bord de mer ou sur le carreau de la mine et cela plusieurs jours avant le chargement dans le minéralier.
- Réalisation des essais de contrôle TVP et jugement de la transportabilité des différents lots de minerai.
- Exposition des stocks à l'aléa climatique pluie ou soleil pendant plusieurs jours
- Chargement du stock dans le minéralier, en direct par convoyeur à bande couvert ou par barges et ce pendant plus de 48 heures. Pendant cette phase de chargement, le minerai est aussi exposé à l'aléa climatique.

Ainsi, depuis la composition du stock jusqu'au chargement, le minerai sera exposé à l'aléa climatique qui peut induire une modification de l'humidité du minerai. Les minerais du groupe 3 qui comportent une forte proportion de grenus sont les plus vulnérables à l'aléa climatique.

La question qui se pose est la suivante : *Est-ce que l'état hydrique des échantillons qui ont servi pour juger la transportabilité du minerai au moment de la constitution des stocks sont représentatifs de l'état du minerai chargé dans le minéralier ?*

Pour répondre à cette question nous distinguons deux phases :

5.3.1. La phase de mise en stock

Pendant cette phase, le minerai est exposé à une humidification sous l'effet des pluies ou séchage. Afin de garantir la représentativité des essais TVP, deux solutions sont proposées :

- La première consiste à empêcher la variation de l'état hydrique par la mise en place d'une couture étanche sur le stock.
- La deuxième se base sur un contrôle de l'humidité des fines < 2 mm. Ce contrôle consiste à comparer l'humidité des fines dans les échantillons qui ont servi aux essais TVP à l'humidité des fines dans le minerai au moment du chargement.

5.3.2. La phase de chargement

Pendant la phase de chargement, le minerai peut subir une humidification soit par une pluie soudaine, soit par les bris d'eau de mer au moment du trajet de la barge entre le quai et le minéralier.

- L'humidification du minerai par les bris d'eau de mer est estimée 0.1 pt d'humidité, soit un volume d'eau de 60 l par barge.
- L'humidification du minerai par une pluie soudaine dépend du temps d'exposition qui sera limité à 40 minutes, délai pour finir le déchargement en cours des barges et pour fermer les cales du minéralier. Pour une pluie de 30 mm d'intensité moyenne sur les 40 minutes, l'augmentation d'humidité du minerai sera limitée à 0.2 pt.

L'humidification du minerai au niveau du stock en bord de mer est supposée négligeable. En effet l'expérience des mineurs a montré que les infiltrations d'eau de pluie n'affectent qu'une croûte de moins de 50 cm à la surface du stock et que l'état hydrique reste inchangé au cœur du stock. Ainsi la charte de bonne pratique prévoit un scalpage de la surface du stock du minerai avant la reprise du chargement.

Ainsi, nous estimons que l'opération de stockage et chargement de minerai présente une possibilité d'humidification par les pluies qui peut être évaluée à 0,3 pt d'humidité.

Afin de tenir compte de l'imprécision sur la procédure de l'essai TVP et de l'aléa climatique, nous proposons une majoration systématiquement l'humidité des échantillons qui serviront aux essais TVP de 1 pt d'humidité.

Tableau 16: Synthèse de l'analyse des aléas relatifs à la réalisation de l'essai TVP

Aléa	Types d'incertitude	Méthode d'estimation de l'incertitude	Marge de sécurité ou précision en équivalent H ₂ O	Commentaires relatifs à la prise en compte de l'incertitude
Détermination de la sollicitation induite par la houle	Définition de la valeur du cisaillement mobilisé en Conditions normales à peu fréquentes (gîte <15°)	Majoration du cisaillement mobilisé de 20 % (1.2 * 13 KPa = 16 KPa).	Marge de sécurité 0.75 point d'humidité sur la liquéfaction. Stabilité de la surface du minerai pour une gîte exceptionnelle de 20°.	Augmentation de la charge sur la pointe de la TVP
Interprétation des essais cycliques	Définition de l'humidité critique	Détermination de l'humidité critique par pas de 1 pt H ₂ O avec l'adoption de la petite valeur provoquant la liquéfaction – 1 pt d'humidité.	Néant	
Calage de l'essai TVP sur les essais cycliques	Différence entre les deux mesures après calage	Moyenne des écarts entre les deux types d'essais pour les différents minerais étudiés.	<u>Erreur estimée à 0.75 point d'humidité</u>	Non compensée
Procédure d'exécution des essais de contrôle TVP	Répétabilité (<i>Blocage par cailloux, compactage, variation fréquence vibration, ...</i>) Perte humidité dans la préparation de l'échantillon	Ecart type moyen des mesures sur les différents minerais.	Erreur mesure estimée à 0.5 point d'humidité <u>Perte d'humidité estimée à 0.2 pt d'humidité</u>	Compensation par la réalisation de 3 à 4 essais TVP pour chaque lot de 5000 tonnes. Non compensée

5.4. Analyse qualitative de l'effet d'échelle

L'effet d'échelle traduit les différences entre les conditions de liquéfaction en laboratoire d'une éprouvette de minerai de petite taille (10 à 60 kg) et les conditions de liquéfaction d'une cale de 5000 tonnes de minerai.

Nous estimons que l'effet d'échelle est plutôt favorable et ce en considérant les aspects suivants :

5.4.1. La faible mobilité du minerai après sa rupture

L'humidité critique déduite de l'essai cyclique est plus faible que la limite de liquidité. La phase de rupture sous l'effet des sollicitations dynamiques n'induit pas une perte totale de la cohésion mais une baisse de la cohésion à moins de 16 KPa. En effet pour les minerais fins, l'humidité critique (proche de 0.8 WI) au moment de la rupture, n'est pas suffisante pour transformer le minerai à un état boueux de forte mobilité. Dans le cas des minerais grenus pour lesquels l'humidité critique des fines dépasse la limite de liquidité au moment de la rupture, la mobilité du minerai sera réduite par l'effet de structure que peut créer les éléments grenus.

5.4.2. Les conditions de drainage

La rupture du minerai sous l'effet des sollicitations dynamiques se produit avec un degré de saturation proche de 85%. Le liquide interstitiel (mélange eau et air) se met en pression et provoque l'annulation de la contrainte inter granulaire. A l'échelle de la cale notamment la partie supérieure, nous estimons que la perméabilité à l'air du minerai est nettement plus forte que la perméabilité dans une éprouvette de petite taille (effet favorable des gros blocs >30 mm, différence de compacité, ségrégation granulométrique dans la cale pouvant créer des zones préférentielles de drainage ...). Les conditions défavorables de drainage des pressions d'air à petite échelle nous poussent à considérer que l'humidité critique déduite des essais cycliques serait sous-estimée.

5.4.3. Les sollicitations induites par les mouvements du minéralier

Les sollicitations induites par les mouvements du minéralier ne sont pas homogènes dans l'ensemble de la cale, les modélisations numériques réalisées à l'échelle de la cale, (*Cf. Synthèse sur la modélisation numérique de la liquéfaction réf: Mecater/CNRT NICKEL/42/EK/B/2011*) montrent que les zones les plus sollicitées se trouvent en surface et au niveau des bordures de la cale. Pour un minerai chargé avec une humidité supérieure à l'humidité critique, l'étendue de la zone liquéfiée dans la cale ne devient significative que pour les valeurs extrêmes de roulis (supérieurs à 15°). Comme ces fortes valeurs de roulis correspondent à des fréquences assez rares, nous pouvons considérer que dans les conditions les plus fréquentes de houles, nous disposons d'une certaine

marge de sécurité. À défaut de calage du modèle numérique de la cale, il est difficile d'estimer cette marge de sécurité.

En prenant en compte la compensation de la précision de l'essai TVP par l'ajout de 1 pt d'humidité et en considérant les conditions normales de houle comme référence, nous estimons que l'essai TVP offre une marge de sécurité minimale qui peut être évaluée à 1 pt d'humidité (conditions de sollicitation sévères et effet d'échelle favorable).

Cependant, il est difficile de confirmer cette marge de sécurité sans confrontation de l'essai TVP au retour d'expérience.

6. CONFRONTATION DES RESULTATS DES ESSAIS TVP AU RETOUR D'EXPERIENCE

Bien que nous n'ayons aucune certitude sur la représentativité des échantillons utilisés pour les essais TVP, nous avons tenté de comparer de façon approximative les résultats des essais TVP réalisés sur certains minerais (compagne mars à juin 2011) au retour d'expérience de transport des mêmes types minerais.

Comme les minerais transportés sont souvent caractérisés par leur humidité moyenne, nous avons traduit les résultats des essais TVP en humidité critique. La démarche de calcul de l'humidité critique est présentée en annexe. Les résultats de la comparaison sont présentés dans le tableau 17.

L'analyse de ces résultats montre que :

- Globalement, l'humidité critique déduite des essais TVP se situe dans l'intervalle des humidités historiques de transport des minerais, sans jamais dépasser la limite supérieure. Sauf pour les minerais les plus argileux SPC4 qui peuvent résister à la liquéfaction avec des humidités élevées (proches de la saturation).
- La liquéfaction survenue dans le Padank Hawk 1999 montre que le FMP déduit du flow test présente un critère sécuritaire au moins pour les latérites.
- Le minerai SMC3 transporté dans le Jule Garnier du 15/02/2008, a subi une liquéfaction avec une humidité de 29.6%, soit 4 pts d'humidité de plus que l'humidité critique déduite de l'essai TVP.
- Le minerai SMC3 transporté dans l'Oriental Angel 1991, a subi un ripage suite à une vague déferlante exceptionnelle sans subir de liquéfaction : Son humidité était à 1 point en dessous de l'humidité critique déduite de l'essai TVP.

- Le 21/04/2011, le capitaine du minéralier a refusé de charger les saprolites caillouteuses d'étoile du Nord à cause de leur apparence pâteuse. Leur humidité était à 27.5 %, soit 1.5 pt d'humidité de plus que l'humidité critique déduite des essais TVP (*l'échantillon utilisé pour l'essai TVP serait représentatif de la cargaison*).

Ainsi, nous pouvons déduire que les conditions de liquéfaction du minerai à l'échelle de la cale seraient moins sévères que les conditions de liquéfaction déduites de l'essai TVP.

Comme on n'était pas sûre de la représentativité des échantillons testés par rapport aux minerais transportés dans la première campagne d'essai (mars à juin 2011), nous avons procédé à une deuxième campagne d'essais sur des échantillons des minerais prélevés dans des cargaisons transportées sans incidents. Les résultats détaillés de ces essais sont présentés dans le tableau 18.

Tableau 17 : Analyse comparative des résultats des essais TVP avec les TML statistiques et le retour d'expérience.

Minerai	Site	% grenus dans l'infra 30 mm	% grenus dans le minerai	H2O global non corrigée (TVP) (%)	H2O critique global corrigée (TVP) (%)	FMP (%)	TML stat (%)	Commentaires
Latérites (L1)	SLN-Poro	0.2	0.2	36	36	37.7	34 - 41	Historique des cargaisons sans incidents (pas de TML stat)
Latérites (L1 bis, 2 ^{ème} prélèvement)	SLN Poro	1	1	38	38		34 - 41	Historique des cargaisons sans incidents (pas de TML stat)
Latérites L2	NMC Kouaoua	10	10	30-31	30-31	33	34-36	Padank Hawk 1999 : liquéfaction dans 4 cales pour H2O minerai > 37% Transport sans incidents pour H2O =36%
Blends (B2)	SMT Nakety	6	6	30	30	32	32 - 36	Historique des cargaisons sans incidents (pas de TML stat)
Blends(B2 bis, 2 ^{ème} prélèvement)	SMT Nakéty	0	0	37	37		32- 36	Historique des cargaisons sans incidents (pas de TML stat)
Saprolites gâteaux laverie (SL2)	SLN Tiébaghi	0.8	0.8	38	38	38		Pas retour d'expérience
Saprolites peu caillouteuses argileuses (SPC4)	NMC Ouaco	18	24.7	36	36	44.3	40	Historique cargaisons : humidité maxi du minerai transporté sans incident
Saprolites peu caillouteuses argileuses (SPC4,	NMC	17	21	41	41		40	Historique cargaisons : humidité maxi

2 ^{ème} prélèvement)	Ouaco												du minerai transporté sans incident
Saprolites peu caillouteuses argileuses (SPCA1)	SLN Poum	27	32	37	37	37	43	37	37	43	37	37	Historique cargaisons : humidité maxi du minerai transporté sans incident
Saprolites moyennement caillouteuses argileuses SPCA2	SLN Tiébaghi	30	26	37	37	37	40	37	37	40	40	40	L'humidité maxi du minerai transporté sans incident = 36 %
Saprolites peu caillouteuses SPC2	NMC Kouaoua	33	44.5	28	28	29	31.5	29	29	31.5	> 37	> 37	TML statistique L'humidité maxi du minerai transporté sans incident = 32.5 %
Saprolites moyennement caillouteuses SMC1	NMC Nakéty	45	60	25	25	26.3	34.4	26.3	26.3	34.4	> 34	> 34	TML statistique L'humidité maxi du minerai transporté sans incident = 31%
Saprolites moyennement caillouteuses SMC3	SLN Kouaoua	45	57	24	24	25.7	31.5	25.7	25.7	31.5	27.7	27.7	TML statistique L'humidité maxi du minerai transporté sans incident = 27.7% Historiques humidité minerai transporté H2O = 20-30%
Saprolites moyennement caillouteuses STC4	SMGM Tontouta	34	43	26	26	28	26	28	28	26	28-40	28-40	TML statistique L'humidité maxi du minerai transporté sans incident = 32%
Saprolites très caillouteuses	SMT	50	68	25	25	27.9	28	27.9	27.9	28	32-35	32-35	TML Stat

SPC1	Nakéty								Historique humidité du minerai transporté : 25 -30%
Saprolites très caillouteuses SMC4	SMT Monié	35	69.6	24.5	27	25	28-34	TML Stat Historique humidité du minerai transporté : 23 -26%	
Saprolites moyennement caillouteuses SMC3 Jules Garnier 15/02/2008	SLN Kouaoua		50 à 60 ?		25.7		29.6	Incident : Liquéfaction du minerai dans certaines cales (H2O minerai 29.6%)	
Saprolites moyennement caillouteuses SMC3 Oriental Angel 1991	SLN Kouaoua		53		25.7			Incident : Ripage du talus du minerai dans les cales suite à une vague exceptionnelle prise de travers (H2O minerai = 24.7%)	
Saprolites moyennement caillouteuses Carrière centre Ouest cargaison 21/04/2011	SLN Étoile du Nord	40	56	25	26.09	30		Précaution : Le capitaine avait refusé le chargement à cause d'une apparence pâteuse des fines, l'humidité globale du minerai = 27.5% Historique humidité du minerai transporté : 25 -32%	

Tableau 18 : Résultats des essais TVP réalisés sur des échantillons de minerais de nickel prélevés dans des cargaisons transportées dans des conditions normales de sécurité ; campagne d'essais du mois d'octobre 2011

Sociétés	Mines	Type de minerais	LOT échantillonné par le mineur et valeur données par la mine					mesure DETI sur cailloux	Transportabilité minérale (TVP) avec 0,3% H2O + cailloux 20/30	% H2O < 30mm		Répartition < 30mm		Deti	
			H2O brut (%)	Grenus (%)	Fe	Mgo	IA=Fe/Mg O			Mesure donnée mine	mesure Deti	supra > 2 mm % dans le 0-30 mm	infra < 2 mm % dans le 0-30 mm	H2O mineral 0-30 mm + cailloux reconstitué	H2O critique mesurée (%)
SMGM groupe 3 ****	Vulcain	STC4	32,0	20,0	16,7	23,0	0,7	11,6	Non (3 mauvais)	31,0	30,1	24,2	75,8	27,0	21,7
SMGM groupe 3 2eme échantillon	VULCAIN BIS	STC4	30,6	18,5	18,6	24,4	0,8	18,0	non 3 mauvais sur 4 mesures	32,7	32,3	26,6	73,4	31,4	27,0
SMT / SMCB Groupe 3	Monéo	SMC4	24,0	45,0	13,3	26,2	0,5	8,9	Oui	Pas disponible	22,0	23,8	76,2	16,9	23,2
SMT / SMN Groupe 3	Nakéty	SPC1	26,1	25,0	13,0	27,1	0,5	9,4	Non (2 bons 2 mauvais)	Pas disponible	27,7	Pas disponible		21,9	20,7
SMSP GROUPE 2	Ouaco	SPC4	Pas disponible	Pas disponible	Pas disponible	Pas disponible	Pas disponible	25,80	Oui	36,5	36,4	17,5	82,5	35,9	39,6
NMC Groupe 3	Nakéty	SMC1	26,9	36,1	Pas disponible	Pas disponible	Pas disponible	19,74	Oui	22,7	25,6	41,6	56,4	22,3	27,2

Les résultats de cette deuxième phase d'essais montre que :

- Mise à part l'échantillon STC4 bis, l'ensemble des échantillons étudiés ne sont pas représentatifs des cargaisons transportées, l'écart entre l'humidité du minerai reconstitué pendant l'essai et l'humidité de la cargaison est d'au moins 4 pt d'humidité. Cet écart peut être attribué aux difficultés de l'échantillonnage pour la mesure du pourcentage des supra 30 mm.
- L'humidité des 20 – 30 mm est proche de 10% mais peut atteindre 20 à 25 % pour les minerais comportant des cailloux très altérés de forte porosité (roche assez tendre).
- Si on fait abstraction de la représentativité, l'essai TVP serait sévère, 3 minerais sur 5 seraient jugés transportables et les deux autres minerais serait non transportables (dont le STC4 qui serait relativement éloigné de la limite), alors que ces mêmes minerais ont été transportés et arrivés à destination sans incidents.

Afin de vérifier la cohérence entre la première et la deuxième campagne d'essais, nous avons comparé les valeurs des humidités critiques TVP mesurée aux valeurs des humidités critiques déduites de la formule expérimentale présentée dans le paragraphe 4.6.1 ; CF. tableau 19.

Tableau 19 : Comparaison entre les humidités critiques déduites des essais TVP (oct 2011) et celles déduites de la formules expérimentale.

Type de minerai	STC4	SMC4	SPC4	SMC1
% grenus supra 2mm	40	58	17.5	63.8
H ₂ O grenus 20 - 30 mm %	18	9	Les supra 20-30 mm se sont pas introduit dans l'échantillon (faible%)	19.7
H ₂ O globale TVP %	27	23.2	39.6	27.2
H ₂ O globale % Formule expérimentale	31.5	22.2	40	29.3
H ₂ O globale du minerai transporté %	30.6	24	36	27
Commentaires	Echantillon représentatif de la cargaison	échantillon non représentatif de la cargaison	Minerai du groupe 2	échantillon non représentatif de la cargaison

Nous déduisons de cette analyse que :

- Pour les minerais SMC4 et SPC4, les résultats des essais TVP sont très proches des résultats des calculs basés sur la formule expérimentale.
- Pour les minerais STC4 et SMC1, les valeurs de l'humidité critique déduite de l'essai TVP sont nettement plus faibles que celles déduites de la formule expérimentale. Nous constatons que ces deux échantillons de minerais comportent des cailloux qui seraient tendres, et qui pourrait être la cause de la réduction de l'humidité critique TVP (rupture des cailloux sous la pointe, ou autre effet de la forte humidité des grenus). Une analyse plus approfondie de ces deux minerais doit être réalisée.
- Dans le cas du minerai STC4, la valeur de l'humidité critique déduite de la formule empirique est plus forte que l'humidité du minerai brute, la cargaison sera donc transportable et ce en cohérence avec le retour d'expérience ; CF. figure 34.

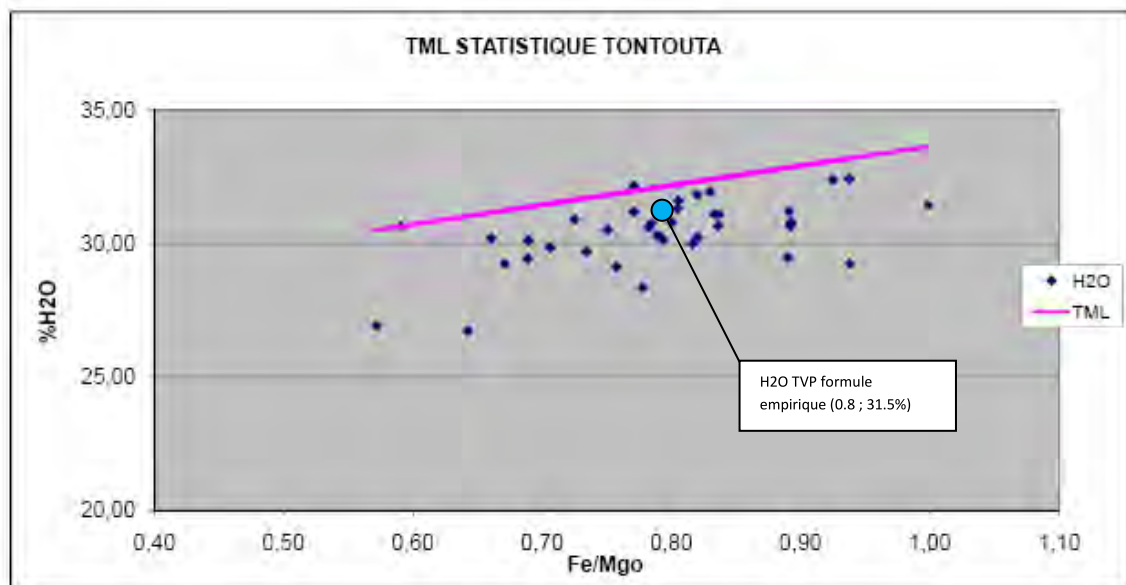


Figure 34 : *Historique de transport des minerais de la mine de Tontouta (Vulcan STC4)*

Malgré les biais relatifs à la représentativité des échantillons utilisés pour les différents essais par rapport aux cargaisons étudiées, nous estimons que l'essai TVP est sécuritaire par rapport au retour d'expérience.

Néanmoins, compte tenu des problèmes d'échantillonnage et de la problématique nouvelle de friabilité des grenus constatée sur certains minerais, nous recommandons une « mise à l'épreuve » du protocole d'essais TVP sur une période de quelques mois et ce dans le but de mieux cerner la marge de sécurité et d'ajuster l'essai à tous les types de minerais.

7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'étude Rhéolat a permis de confirmer la sensibilité de tous les minerais de nickel de Nouvelle Calédonie à la liquéfaction au cours du transport maritime. Plus le minerai est humide, plus sa sensibilité à la liquéfaction augmente.

La liquéfaction se produit dans la fraction infra 2 mm pour un degré de saturation supérieur à 85%. L'augmentation de la plasticité de la fraction 0 – 0.064 mm réduit la sensibilité des minerais à la liquéfaction.

Pour les minerais fins (latérites et saprolites terreuses), l'humidité critique au-delà de laquelle le minerai devient liquéfiable est proche de $0.8 * WL$ (limite de liquidité). Ainsi les saprolites terreuses qui présentent une forte plasticité ont des humidités critiques élevées ; pouvant atteindre 40%.

Dans le cas des minerais grenus, la liquéfaction se produit dans la fraction des fines <2 mm qui joue le rôle de lubrifiant dans une structure granulaire. Au-delà de 30%, la fraction grenue (supra 2 mm) joue un rôle stabilisateur, cet effet favorable devient remarquable lorsqu'elle dépasse 60%. Dans ce cas, la liquéfaction se produit pour des valeurs d'humidité des fines très élevées qui peuvent dépasser $1.2 * WL$.

Une formule empirique de prédiction de l'humidité critique des minerais de nickel a été proposée. Elle dépend de la limite de liquidité des fines et du pourcentage des grenus. La validation de la formule nécessite des essais spécifiques à chaque type de minerai.

Le FMP déduit du flow test donne des résultats cohérents avec les essais cycliques sauf pour les minerais argileux et les minerais grenus. La liquéfaction survenue dans le Padank Hawk en 1999 montre que le FMP déduit du flow test présente un critère sécuritaire au moins pour les latérites.

L'essai TVP a été adapté avec succès pour les minerais de nickel. En se basant sur cet essai, nous avons proposé une procédure de contrôle de la transportabilité des minerais. Le délai d'exposition des minerais aux conditions climatiques entre la phase de l'échantillonnage et la phase de chargement du minerai, induit un risque d'humidification du minerai par les pluies. Les minerais grenus sont les plus vulnérables à cette humidification.

Afin de palier à ce risque, une charte de bonne pratique de stockage et de chargement des minerais a été proposée. La prise en compte des imprécisions de l'exécution de l'essai nécessite une humidification supplémentaire des échantillons de 1 pt d'humidité avant la réalisation des essais.

La confrontation des résultats des essais TVP au retour d'expérience semble montrer que l'essai est sécuritaire. Néanmoins, compte tenu :

- de la problématique nouvelle de la friabilité des grenus constatée sur certains minerais du groupe 3 qui rend le test relativement sévère,
- du fait que le nouvel essai TVP est plus sévère que le flow test et que l'essai TVP référencé dans l'IMSBC pour les latérites,

nous recommandons une « mise à l'épreuve » du protocole d'essais TVP sur une période de quelques mois et ce dans le but de mieux cerner la marge de sécurité et d'ajuster l'essai à tous les types de minerais.

Pendant cette période de mise à l'épreuve, le nouveau protocole basé sur les essais TVP sera mis en place au même temps que le TML statistique (version améliorée). Pour chaque cargaison les résultats des deux protocoles seront confrontés, avec une analyse systématique des différences, tout en se référant au retour d'expérience (état de la cargaison à l'arrivée, conditions de navigation, ...). Une ré-estimation des contraintes appliquées dans le nouvel essai TVP peut être nécessaire pour recalibrer l'essai par rapport au retour d'expérience. Pour ce faire il est fortement recommandé de réaliser une expérimentation de quelques minéraliers au cours du trajet (accéléromètres, capteurs de pressions interstitielles) et de faire appel à des experts en matière de transport maritime.

Les progrès réalisés dans le projet Rhéolat, permettent d'apporter des améliorations significatives de la méthode TML statistique utilisée pour les minerais grenus (groupe 2 et 3).

Ces progrès, nous laissent penser qu'il est possible de développer une formule empirique, de prédiction de l'humidité critique des fines, spécifique à chacun des minerais notamment les minerais grenus.

ANNEXE

DEMARCHE DE CALCUL DE L'HUMIDITE CRITIQUE D'UN MINERAI A PARTIR DES RESULTATS DES ESSAIS TVP

La procédure de calcul de l'humidité globale corrigée se fait de la façon suivante :

1. Faire la conversion de l'humidité globale en teneur en eau par la formule :

$$W_{\text{éq}} = \%H_2O / (1 - \%H_2O)$$

2. Calculer la teneur en eau des fines d'après la formule suivante :

$$W_f = (w_{\text{éq}} - w_g \times (1 - \Phi_f)) / \Phi_f \text{ Avec :}$$

w_g est la teneur en eau dans les grenus = 5%

Φ_f est le pourcentage des fines dans l'infra 30 mm

3. Calculer l'humidité des fines par la formule suivante :

$$\% H_2O = w_{\text{éq}} / (1 + w_{\text{éq}})$$

4. Corriger l'humidité des fines de la façon suivante :

- 4.1. Détermination de la différence entre le pourcentage des grenus contenus dans l'infra 30 mm et le pourcentage des grenus dans le minerai

- 4.2. Calcul de ΔH_2O fines de la façon suivante :

- Si le pourcentage des grenus est entre 0 et 66% alors $\Delta H_2O_f = 1.6$ pour un pourcentage des grenus ajouté de 10 %
- Si le pourcentage des grenus est entre 66 % et 100 % alors $\Delta H_2O_f = 8.5$ pour un pourcentage des grenus ajouté de 10 %

5. Correction de H_2O des fines : H_2O fines corrigé = H_2O fines + ΔH_2O_f

6. Conversion de l'humidité des fines en teneur en eau des fines

7. Calcul de la teneur en eau globale avec la formule suivante :

$$w_{\text{éq}} = w_f \times \Phi_f + w_g \times (1 - \Phi_f)$$

La teneur en eau des grenus w_g est égale à 17%

Conversion de la teneur en eau globale corrigée en humidité corrigée.

CNRT "Nickel et son environnement"

Tome Nickel et Technologie

