

APPORT DE LA NORME XP P 84-705 POUR LA RÉALISATION D'ESSAIS DE PERFORMANCE SUR LES GÉOSYNTHÉTIQUES BENTONITIQUES

CONTRIBUTION OF THE STANDARD XP P84-705 FOR THE REALIZATION OF PERFORMANCE TESTS ON GEOSYNTHETIC CLAY LINERS (GCL'S)

Véronique NOROTTE¹, Catherine POTHIER¹, Alain COURADIN¹, Gérard DIDIER¹

¹ : INSA Lyon – URGC (Unité de Recherche en Génie Civil) – Villeurbanne (France)

RÉSUMÉ - La norme AFNOR XP P 84-705 permet de réaliser des essais de conformité ou de performance de toutes les familles de géosynthétiques bentonitiques (GSB). Divers exemples d'essais de performance hydraulique sont décrits dans cet article où les conditions d'essais sont définies par le contexte du projet en prenant en compte l'essentiel des paramètres rencontrés in situ pouvant avoir une incidence sur les performances du GSB comme : la nature des matériaux constitutifs de la couche support ou de confinement, la contrainte de confinement pendant la phase de saturation, la contrainte maximale en service, la charge hydraulique en eau ou de tout autre liquide.

Mots clés : géosynthétique bentonitique, perméabilité, essai de performances, oedoperméamètre

ABSTRACT - Standard AFNOR XP P 84-705 allows to carry out conformance and performance tests for all the Geosynthetic Clay Liners (GCLs). Various examples of hydraulic performance tests are described in this paper corresponding to test conditions defined by the context of the project and taking into account the main in situ parameters that can affect the hydraulic performances of GCL. These parameters are the nature of materials used for support or containment layer, the confining stress during the saturation phase, the maximum in service stress, the hydraulic head with water or all other liquid.

Keywords: geosynthetic clay liner, water conductivity, performance test, oedopermeameter

1. Introduction

L'utilisation des GSB en France dans les dispositifs d'étanchéité remonte à 1989. L'étanchéité est assurée par saturation sous contrainte de la couche de bentonite encapsulée entre deux géosynthétiques, l'ensemble étant solidarisé par collage, couture ou aiguilletage (CFG, 1998).

Les valeurs de perméabilité annoncées par les fabricants sont très faibles comprises entre 1.10^{-10} m/s et 1.10^{-12} m/s. Il est souvent demandé dans les CCTP de contrôler la conformité des produits et particulièrement leurs caractéristiques hydrauliques en réalisant un essai de perméabilité en laboratoire. Cependant, l'objectif peut être d'obtenir dans les conditions rencontrées sur site les performances annoncées. Dans ce cas, il est nécessaire de réaliser des essais de performance où on pourra fixer certains paramètres en fonction des conditions spécifiques au projet.

Ainsi, deux types d'essais peuvent être réalisés en fonction de l'objectif recherché :

- des essais de conformité afin de déterminer avec des conditions d'essai toujours identiques si les caractéristiques hydrauliques du GSB réceptionné sont conformes à celles annoncées ;
- des essais de performance afin de déterminer les caractéristiques hydrauliques du GSB placé dans des conditions rencontrées dans un projet que ce soit pour la contrainte normale, la charge hydraulique, la nature de la solution d'infiltration ou des matériaux en contact.

Plusieurs types de GSB sont commercialisés en France et les valeurs de perméabilité annoncées dans leurs fiches techniques font référence à l'une des normes suivantes : ASTM 5887-99 (USA), DIN 18130 (Allemagne) et XP P 84-705 (France). Ces normes diffèrent par l'appareillage utilisé, la procédure et les conditions d'essais. Les différences de conditions d'essais et de mesure des résultats peuvent conduire à un écart du coefficient de perméabilité calculé, or l'objectif du maître d'ouvrage est de connaître les débits de fuite attendus in situ dans les conditions réelles du projet.

Après une description rapide de l'appareillage et de la procédure d'essai de la norme AFNOR, nous indiquerons les principales différences par rapport à la norme ASTM, puis nous développerons des études qui ont pu être menées grâce ce dispositif.

2. Description de l'essai

2.1 Principe et calculs

L'essai consiste à mesurer la quantité d'eau ou de tout autre liquide qui traverse pendant une durée fixée sous l'effet d'une différence de charge hydraulique, H , une éprouvette saturée – avec un diamètre, D_u , correspondant à la surface d'essai - placée dans une cellule, soumise à une contrainte de confinement imposée, σ .

A partir des volumes infiltrés au cours du temps, on détermine les caractéristiques hydrauliques exprimées par le flux surfacique, F , la permittivité, ψ , et/ou le coefficient de perméabilité, k , calculé en appliquant la loi de Darcy avec les équations suivantes.

$$F = \frac{V}{\Delta t \cdot A} \quad (\text{m}^3/\text{m}^2/\text{s}) \quad (1)$$

où V : volume entrant ou sortant (m^3) pendant une durée Δt (s)
 A : surface de l'éprouvette concernée par l'écoulement (m^2) = $\pi D_u^2/4$

$$\psi = \frac{F}{H} \quad (\text{s}^{-1}) \quad (2)$$

où H : différence de charge hydraulique (m)

Pour les GSB ayant une permittivité constante pour trois valeurs différentes de la charge hydraulique appliquée et une épaisseur constante sur toute la surface d'essai, le calcul du coefficient de perméabilité est donné ci après.

$$k = \psi \cdot H \quad \text{ou} \quad k = \frac{F}{i} \quad (\text{m/s}) \quad (3)$$

où i : gradient hydraulique (= H/h), h étant l'épaisseur de l'éprouvette (m)

2.2 Dispositif et conditions d'essais

Pour la norme ASTM D5887-99 qui est une adaptation de la norme pour les sols ASTM D5084, la cellule utilisée est un triaxial qui permet de tester une éprouvette de 100 mm de diamètre, D_u . Cette dimension des éprouvettes est faible quand il s'agit de tester des GSB comportant des coutures ou des liens. Les conditions d'essais imposent une contrainte normale sur l'éprouvette égale à 35 kPa et une charge hydraulique égale à 1,5 m. Ces conditions peuvent convenir pour un essai de conformité mais elles ne permettent pas une évaluation du flux ou du coefficient de perméabilité pour des conditions spécifiques à un projet, par exemple lorsque la contrainte de confinement est faible (10 kPa). Les critères d'arrêt, que ce soit pour la phase de saturation (48h maximum) ou la mesure du flux surfacique avec un écart autorisé entre les débits entrant et sortant de ($\pm 25\%$), ne permettent pas d'être certain de la stabilité du régime d'écoulement au travers du GSB au moment de la mesure. En effet la phase de saturation de la bentonite peut être nettement plus longue et l'état de saturation influe fortement sur la perméabilité.

En 1996, nous avons conçu et réalisé un appareillage (oedoperméamètre) avec un mode opératoire spécifique à l'étude des caractéristiques hydrauliques des GSB. Ces travaux (Comeaga, 1998) ont conduit à la norme AFNOR XP P 84-705 actuellement en cours de révision. Cette norme permet de réaliser des essais de conformité mais aussi de performance qui permettent d'évaluer le flux surfacique, F , et/ou le coefficient de perméabilité, k , sur des échantillons de GSB prélevés in situ ou sur des échantillons intacts en fixant, suivant le scénario étudié, les paramètres suivants :

- contrainte normale ;
- charge hydraulique ;
- solution d'essai ;
- nature et état des matériaux en contact avec le GSB.

L'appareillage utilisé est constitué d'un dispositif de chargement qui permet l'application d'une contrainte normale pouvant varier de 5 à plus de 300 kPa, et d'une cellule de type **oedoperméamètre** comprenant les éléments suivants (figures 1 et 2) :

- une embase équipée d'un logement pour le dispositif drainant, pierre poreuse ou couche de billes de verre, reliée au contrôleur pression-volume (CPV) permettant de suivre le volume d'eau infiltré, V_e ;

- un piston cylindrique comportant le disque drainant de diamètre D_u relié au dispositif de collecte des volumes d'eau percolé, V_s ;
- un autre type d'oedoperméamètre présenté figure 1 comporte un cylindre de confinement des bords du GSB quand il est, par exemple, demandé de tester le GSB associé à la couche support ou/et de confinement présente sur site. La zone concernée par l'écoulement aura un diamètre minimum D_u de 200 mm.

Dans cette version l'oedoperméamètre permet de tester les performances d'un GSB prélevé in situ et présentant un état de surface marqué par les éventuels matériaux granulaires en contact. Dans ce cas la couche sous le GSB sera constituée de billes de verre de diamètre 0,5 mm et sur le GSB une couche de sable fin comblera les vides et transmettra par l'intermédiaire du piston la contrainte de confinement que nous avons in situ

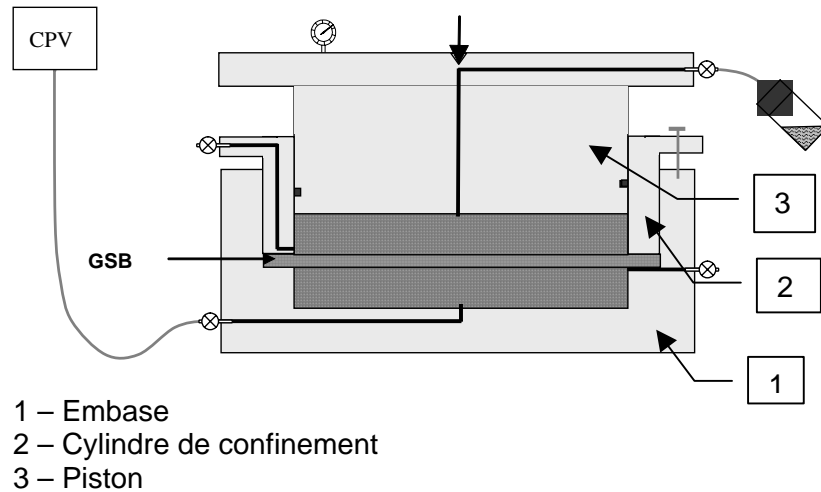


Figure 1. Oedoperméamètre



Figure 2. Dispositif d'essai, cellule et bâti

Ces dispositifs permettent de suivre les cinétiques de gonflement ou de consolidation, et pour chaque charge hydraulique de suivre la cinétique d'infiltration et de collecter les percolats.

3. Impact de la contrainte de confinement

La contrainte de confinement est un paramètre déterminant car elle conditionne la structure et la densité de la bentonite que ce soit pendant la phase de saturation ou en service. Nous savons (CFG, 1998) que la perméabilité d'une couche de bentonite diminue fortement avec sa densité sèche.

Le gonflement du GSB dépend de la contrainte de confinement appliquée pendant la saturation de la bentonite. Nous avons mesuré sur un même type de GSB aiguilleté (masse surfacique en bentonite supérieure à 5 kg/m^2), le gonflement accompagnant la saturation pour différentes valeurs de la contrainte normale. On relève un gonflement de 4 mm sous une contrainte de 2 kPa et de 1 mm pour une contrainte de 50 kPa. Le gonflement diminue quasi linéairement avec le logarithme de la contrainte normale appliquée, ce qui permet de déterminer graphiquement la pression de gonflement du GSB, ici 200 kPa, pour laquelle le gonflement est nul.

En fond de CSD, le GSB commence par s'hydrater au contact des matériaux de la couche support sous une faible contrainte de confinement ($\sim 10 \text{ kPa}$). Par la suite, cette contrainte de confinement augmente avec le remplissage du casier par les déchets pour atteindre des valeurs importantes supérieures à 100 kPa (fonction de la hauteur de déchets). Cette augmentation de contrainte induit une consolidation de la bentonite et une diminution de sa densité accompagnée d'une orientation des « feuillets » perpendiculairement à la contrainte ce qui conduit à une réduction du coefficient de perméabilité.

Nous présentons ci-après les résultats d'un essai réalisé sur le même type de GSB que précédemment et ayant été saturé sous une contrainte de 20 kPa (couche de 1 m ayant un poids volumique de 20 kN/m^3). Nous avons mesuré le flux surfacique pour une charge hydraulique égale à 1 m, puis nous avons augmenté progressivement la contrainte par paliers pour atteindre 320 kPa. Nous présentons ci après l'évolution du tassement cumulé, dh_{cum} (figure 3) et du coefficient de perméabilité, k (figure 4) en fonction de l'augmentation du logarithme de la contrainte.

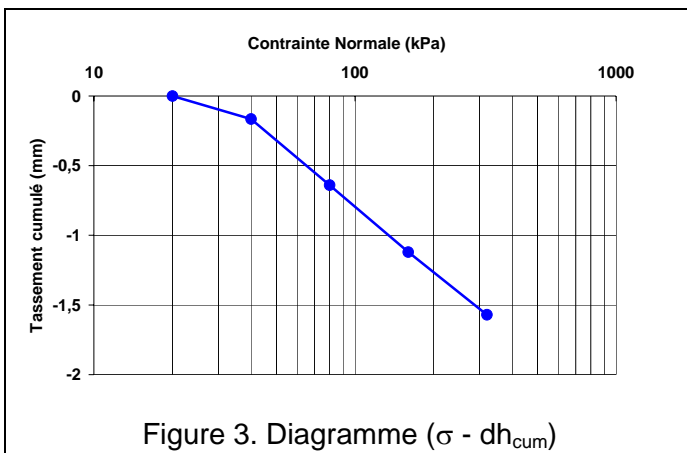


Figure 3. Diagramme ($\sigma - dh_{cum}$)

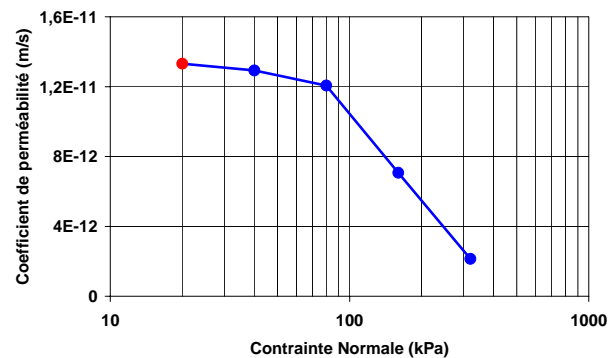


Figure 4. Diagramme ($\sigma - k$)

Nous constatons une réduction de l'ordre d'une puissance de 10 quand on augmente la contrainte de 20 à 320 kPa.

4. Compatibilité chimique ou impact de la solution d'essai

Une question récurrente concerne l'éventuelle modification des propriétés des bentonites en contact avec des solutions salines. En effet la plupart des matériaux argileux ont la faculté (plus ou moins grande) d'échanger les cations présents dans leur structure avec les cations présents dans la solution. De nombreux chercheurs ont étudié l'influence de cet échange sur la modification de la perméabilité. Comeaga (1998), a montré qu'en cas de contact avec un lixiviat synthétique, une saturation préalable à l'eau déminéralisée du GSB était favorable. Il faut donc que le dispositif permette de changer la solution en cours d'essai.

Dans le cadre du programme LIXAR (2003) nous avons testé un GSB aiguilleté ayant une masse surfacique de bentonite sodique naturelle sèche supérieure à 5 kg/m^2 en contact avec trois types de solutions : une solution neutre FI ($\text{NaCl } 10^{-3} \text{ M}$), un lixiviat réel LR et une solution LS de $\text{CaCl}_2 \cdot 10^{-1} \text{ M}$. Nous présentons figure 5 la cinétique de gonflement du GSB sous une contrainte de 10 kPa en fonction

de la solution d'essai. Après la phase de gonflement/saturation, la solution d'essai en amont du GSB (réservoir d'alimentation, circuits, pierre poreuse) a été soit conservée soit remplacée par LR ou LS. Nous avons ensuite augmenté la charge hydraulique et suivi l'évolution du flux, F , au cours du temps pour calculer le coefficient de perméabilité. Les percolats ont été collectés en sortie de cellule au fur et à mesure en vue de leur caractérisation (conductivité électrique, pH et analyses chimiques). Nous représentons (figure 6) l'évolution du coefficient de perméabilité en fonction de la fraction des vides, n_{Vv} , qui correspond au nombre de fois où le volume des vides de la bentonite a été traversé par la solution d'essai. Les résultats sont regroupés dans le tableau I.

Tableau I. Résultats des essais de perméabilité

Essai	0'a	1a	2a	3a	4a
Solution de saturation	FI	LS	LR	FI	FI
Solution de percolation	FI	LS	LR	LS	LR
G (mm)	1,82	0,6	1,07	1,64	2,04
k_i ($\times 1.10^{-11}$ m/s)	4,8	400	< 1	4	3,4
k_f ($\times 1.10^{-11}$ m/s)	1	90	1,4	60	1,2

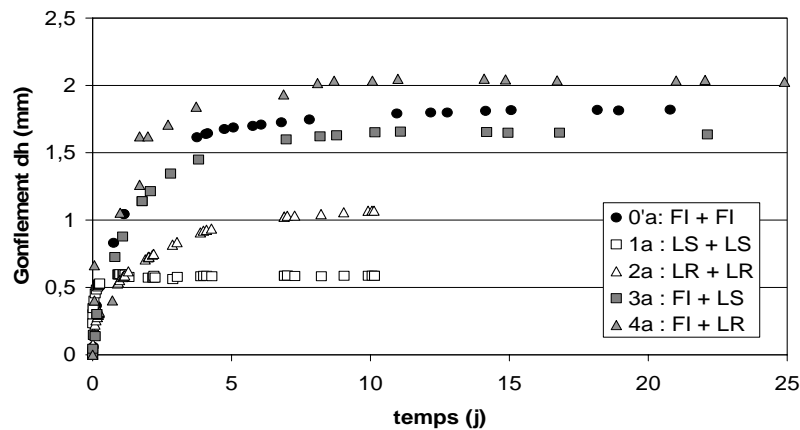


Figure 5. Cinétique de gonflement en fonction de la solution de saturation

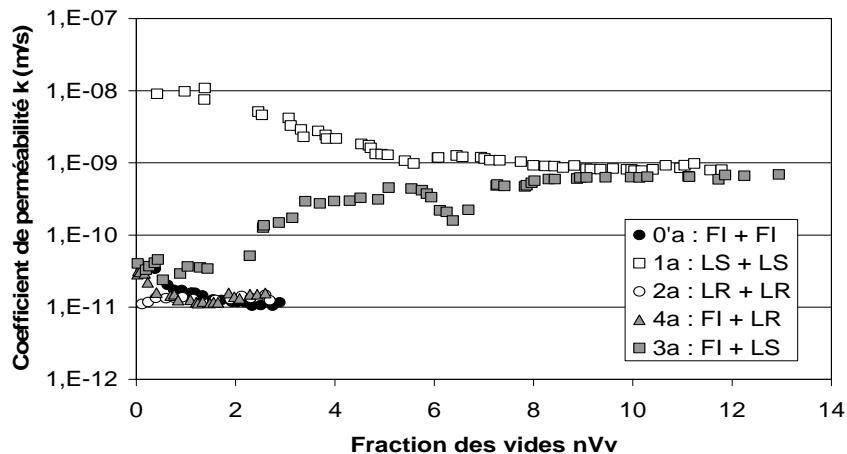


Figure 6. Evolution de la perméabilité en fonction de la solution d'essai

La figure 5 montre l'impact de la nature de la solution sur le gonflement de la bentonite pour une contrainte de 10 kPa. On constate une réduction du gonflement avec LR et plus marquée avec LS. La figure 6 indique une augmentation de la perméabilité avec LS et ce d'autant plus si cette solution a été utilisée pour la phase de saturation de la bentonite. Par contre, on ne constate aucun effet négatif avec le lixiviat réel LR, que la bentonite soit préhydratée avec ce lixiviat ou avec une solution neutre FI.

Ces résultats, obtenus après des durées d'essais parfois supérieures à 6 mois, mettent en évidence l'intérêt de réaliser des essais en laboratoire avec des conditions proches du site où le GSB sera en

contact prolongé avec la solution chargée en ions. D'autre part, l'évolution des cinétiques de gonflement en fonction de la solution d'essai apporte des informations utiles à la compréhension des comportements hydrauliques ultérieurs.

5. Impact de la nature de la couche de confinement

Les essais de performance hydraulique sur les GSB usuellement présentés dans la bibliographie concernent un GSB placé entre deux structures planes parallèles donc dans des conditions idéales. In situ si on maîtrise plutôt bien le compactage de la couche support permettant d'atteindre une surface plane fermée, ce n'est pas le cas de la couche de confinement qui quelquefois est constituée d'un matériau granulaire plus ou moins grossier. Nous avons constaté à l'occasion d'autopsies faites in situ, des états de surface du GSB assez contrastés (figures 7 et 8) pouvant conduire à des performances hydrauliques conformes ou non.

Il est donc utile de prendre en compte ce paramètre (couplage GSB/sol de confinement) dans l'évaluation des performances du GSB. D'autre part, si le matériau de confinement est calcaire la solution d'infiltration va se charger en ions (Ca^{+}) avant de traverser la bentonite du GSB.

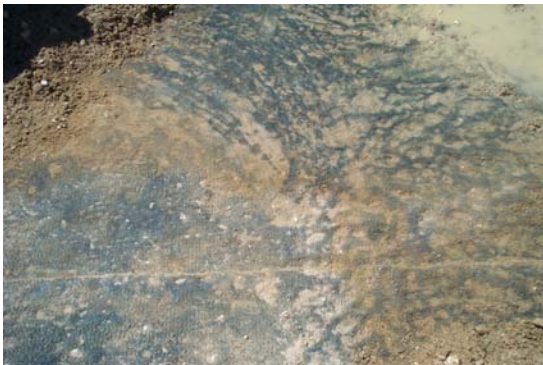


Figure 7. GSB marqué par le matériau de confinement



Figure 8. GSB recouvert *in situ* par un géosynthétique de drainage

L'appareillage proposé permet de tester le bicouche constitué du GSB recouvert par une couche de matériau de confinement d'épaisseur comprise usuellement entre 5 et 10 cm. Sur le bicouche, on ajoute si nécessaire un géofiltre et une couche de sable (figure 11) pour obtenir une surface finale plane pour la pose du piston.

Nous présentons ci après les résultats sur un GSB aiguilleté (figure 9) ayant une masse surfacique de bentonite calcique supérieure à 8 kg/m^2 et recouvert par une couche granulaire de craie (figure 10) de 6 cm de hauteur tamisée à 20 mm. De l'eau déminéralisée est introduite par l'embase pour la phase de saturation, puis le réservoir d'eau est déplacé et raccordé au piston surchargé afin d'appliquer la contrainte normale d'essai.



Figure 9. GSB placé dans embase (étanchéité latérale)



Figure 10. couche de craie compactée sur GSB



Figure 11. couche de sable pour régaling final

Dans cet essai, le gonflement du bicouche pendant la phase de saturation est égal à 1,56 mm sous une contrainte de 5 kPa. Le coefficient de perméabilité sous cette contrainte, k_{5kPa} , est égal à 1.10^{-10} m/s. Quand on augmente la contrainte à 15 kPa, le bicouche se consolide. Après deux mois d'essai avec une charge hydraulique de 0,5 m, la perméabilité a diminué pour atteindre une valeur, k_{15kPa} , égale à 8.10^{-11} m/s.

Cet essai a montré que la perméabilité du GSB n'a pas été affectée par la nature et la texture granulaire des matériaux calcaire de confinement

6. Conclusion

Nous avons montré à partir de quelques exemples d'études que le dispositif d'essai décrit dans la norme XP P 84-705 permet de tester le GSB avec des conditions spécifiques à chaque projet, qui peuvent modifier plus ou moins fortement les performances hydrauliques évaluées par un simple essai de conformité, surtout si on se réfère à la norme ASTM.

Ainsi, nous avons mis en évidence par nos résultats l'importance d'une évaluation des performances hydrauliques avec des conditions d'essai les plus proches possible des conditions rencontrées in situ, notamment en ce qui concerne la contrainte normale (ou de confinement) appliquée pendant la phase de saturation puis pendant la phase d'exploitation, la composition de la solution d'essai pendant chacune de ces périodes et la nature des matériaux (notamment calcaire) en contact avec le GSB.

7. Références bibliographiques

- Comeaga L. (1998) Dispositifs d'étanchéité par géosynthétiques bentonitiques dans les centres de stockage de déchets, *Thèse de doctorat, INSA Lyon (France)*.
- CFG (1998). Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par géosynthétiques bentonitiques, fascicule n°12.
- Guyonnet D., Norotte V., Touze-Foltz N., Pons C.-H., Clinard CH., Didier G., Gaucher E., Gaboriau H. (2003), LIXAR : Interactions lixiviat argiles, BRGM/RP-52449-FR.
- Norotte V., Didier G., Guyonnet D., Gaucher E. (2004) Evolution of GCL hydraulic performance during contact with leachate, *Advances in Geosynthetic Clay Liner Technology : 2nd Symposium, ASTM STP 1456, R.E., Mackey and K. Von Maubeuge (Eds.)*