

EXAMEN APRÈS 12 ANS DE SERVICE D'UNE GÉOMEMBRANE BITUMINEUSE UTILISÉE EN COUVERTURE DE STOCKAGE DE DÉCHETS

EXAMINATION OF A BITUMINOUS GEOMEMBRANE AFTER 12 YEARS OF USE AS A COVER FOR A WASTE STORAGE AREA

A. MARCHIOL ¹, M.A. ROMERO ², Jean-Paul BENNETON ³, Ph. DUMAS ⁴, Jean-Luc GAUTIER ⁵

¹ Andra, Centre de l'Aube, France

² Andra, Châtenay Malabry, France

³ CETE de Lyon, LRPC de Lyon, France

⁴ CETE d'Aix en Provence, France

⁵ Société COLAS, France

RÉSUMÉ – Cette communication décrit les résultats d'examens effectués sur une géomembrane bitumineuse en service depuis 10 à 12 ans pour l'étanchéité de la couverture d'un centre de stockage de déchets faiblement radioactifs exploité par l'Andra sur le Centre de stockage de la Manche (CSM) (La Hague). Ces investigations concernent les caractéristiques physiques et mécaniques de la membrane et les caractéristiques physico-chimiques du liant. Ces résultats sont comparés avec ceux mesurés sur des échantillons témoins du même âge conservés à l'intérieur d'un hangar.

Mots-clés : Etanchéité - Stockage - Déchets - Géomembrane - Durabilité.

ABSTRACT – This paper describes the results of the tests carried out on a bituminous geomembrane in service for 10 to 12 years and used as an impervious cover on top of a storage center for low activity radioactive waste operated by Andra at the CSM center (Centre de stockage de La Manche) in La Hague, France. These investigations concerned the physical and the mechanical properties of the membrane and the physico-chemical properties of the binder. These results were compared with those measured on two reference samples of the same age, stored inside a warehouse.

Keywords : Waterproofing - Landfilling - Waste - Geomembrane - Durability

1. Présentation de l'ouvrage

Autorisé par décret en 1969 et exploité jusqu'en 1994, le Centre de la Manche (photo n° 1) est le premier centre en France de stockage en surface de déchets solides, faiblement et moyennement radioactifs à durée de vie courte (gants, chiffons, filtres, etc., entrés en contact avec des matières radioactives utilisées dans l'industrie nucléaire, les hôpitaux, les centres de recherche...). En 25 ans, 525 000 m³ de déchets y ont été stockés sur une surface de 11 hectares (15 hectares de surface totale). Une couverture imperméable complète le confinement et la protection des colis de déchets afin d'assurer la sûreté à long terme de l'environnement. La mise en place de la couverture de 1990 à 1996 a été la dernière étape avant l'entrée du Centre dans une longue phase de surveillance de l'ordre de 300 ans. Cette étape correspond à la période nécessaire à la décroissance d'activité des éléments radioactifs stockés sur le Centre.

2. Présentation du DEG

La morphologie de la couverture est une succession de plans en forme de toit, inclinés alternativement de 6 % à 14 % (figure 1). La dimension maximale du plan de toiture est de 140 m x 25 m. La distance entre deux points bas est de 50 m maximum. En bordure du stockage, la couverture latérale est disposée en talus avec à une pente de 2,3H (horizontale) pour 1V (verticale). Des routes sommitale et périphérique permettent les accès pour la surveillance du site.

Le concept de couverture repose sur trois critères (Imperméabilité, Protection, Pérennité) qui ont conduit à décliner la couverture en deux parties, chacune devant répondre au critère de pérennité :

- la barrière biologique en surface pour protéger des agressions externes d'origine naturelle (pluie, érosion, variations climatiques...), animale ou humaine ;
- la barrière imperméable pour limiter les infiltrations d'eaux météoriques vers les colis de déchets.



Photo n° 1 - Vue aérienne du Centre de la Manche



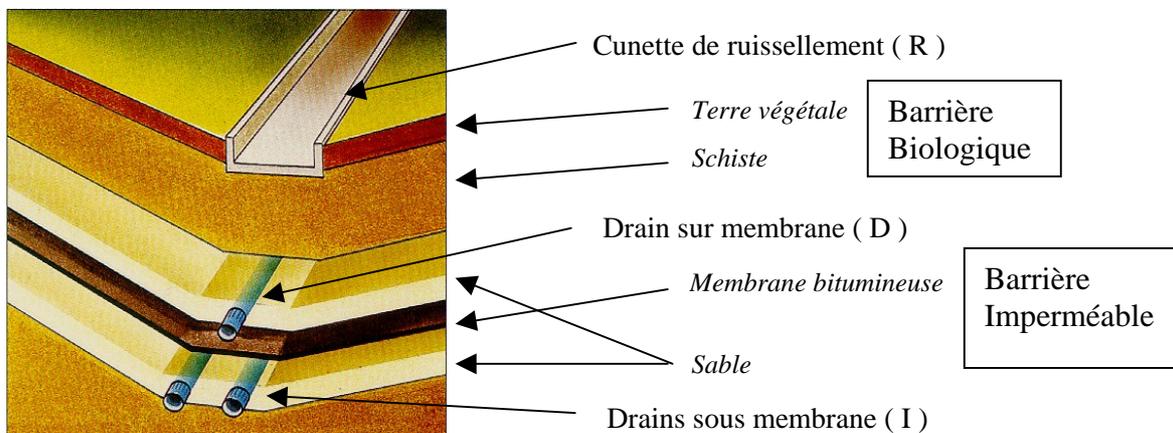
Géomembrane
Matériaux granulaires
Colis de déchets

Figure 1 - Coupe schématique de la couverture

La couverture se compose d'une structure multicouche reposant sur l'alternance de matériaux naturels de perméabilités différentes (figure 2). Le matériau de faible perméabilité retenu est une géomembrane bitumineuse (figure 3), qui offre des garanties d'imperméabilité satisfaisantes et qui a l'avantage de bien s'adapter aux tassements éventuels des remblais et déchets sous-jacents.

Le complexe multicouche est constitué du bas vers le haut par :

- une couche de forme en matériaux grossiers compactés à base de schistes et grès ;
- une couche drainante en sable fin destinée à servir de support anti-poinçonnement à la membrane ;
- une membrane bitumineuse assurant l'étanchéité ;
- une couche drainante en sable fin destinée à éviter la mise en charge hydraulique permanente de la membrane, et à recueillir les eaux d'infiltration ayant transité à travers la barrière biologique ;
- une couche de matériaux grossiers compactés, destinée à réguler l'arrivée des eaux d'infiltration sur la membrane et surtout à protéger cette dernière d'éventuels racines et animaux fouisseurs ;
- une couche de terre végétale, favorisant l'engazonnement et l'évapotranspiration.



Cunette de ruissellement (R)

Terre végétale

Schiste

Barrière Biologique

Drain sur membrane (D)

Membrane bitumineuse

Sable

Barrière Imperméable

Drains sous membrane (I)

Figure 2. Coupe schématique de la couverture en point bas

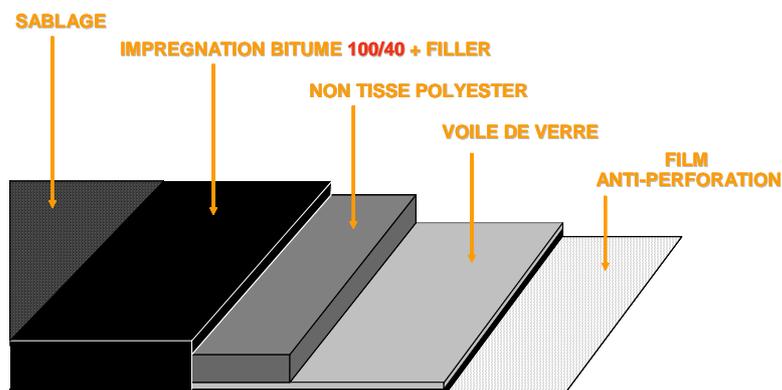


Figure 3. Descriptif de la structure de la géomembrane (Colétanche NTP 4)

3. Objectifs de l'étude

Dans le cadre de la surveillance de la couverture du Centre, quatre types de contrôles sont réalisés périodiquement :

- contrôle visuel de surface lors d'inspection ;
- contrôle topographique des cibles de l'ensemble de la couverture ;
- contrôle hydraulique des différents réseaux de récupération des eaux ;
- contrôle par prélèvement d'échantillons de membrane.

Dès 1996, les périodes de prélèvements de membrane ont été définis, tous les 5 à 10 ans en fonction des résultats acquis, avec pour objectif premier de vérifier la qualité (et en particulier l'étanchéité) de la membrane vieillie in situ. Les premiers prélèvements ont été réalisés en 1997, sur des tranches (Tr) (figure 4) de couverture âgées de 2 ans (Tr2) et 5 ans (Tr1). Leur analyse n'a pas révélé d'évolution des propriétés sur cette courte période d'observation. À l'occasion des prélèvements de l'année 2005 (en Tr1 et Tr3), un second objectif est visé, à savoir la recherche d'indicateurs pertinents pour caractériser la cinétique très lente du vieillissement : caractéristiques physique ou chimique de la membrane et de ses composants, etc. pouvant être reliés à une diminution de la performance, et ainsi permettre d'estimer la durée au-delà de laquelle la membrane ne jouera plus sa fonction d'imperméabilité.

Ce second objectif a nécessité de définir des analyses et essais complémentaires, en tenant compte de l'expérience acquise sur ce type de membrane, lors de la qualification du produit avant la construction en 1990, et lors des premiers prélèvements en 1997.

Lors d'études antérieures, la réflexion concernant la durabilité de la membrane a conduit l'Andra à réaliser des essais de vieillissement accéléré, menés de 1990 à 1992, en couplant oxydation (brouillard d'eau oxygénée à 60°C) et déformation de 3 à 6 %, aussi bien en partie courante qu'en zone de joint. Diverses caractéristiques ont été contrôlées, dont la température de ramollissement, les fractions constitutives du bitume, le taux d'oxydation ainsi que l'étanchéité selon différentes techniques (perméabilité et diffusion). En complément, une membrane NTP3 posée en fond de décharge industrielle a été prélevée et analysée.

À partir de l'évolution de la température de ramollissement bille anneau, une corrélation a été établie entre vieillissement naturel et vieillissement accéléré : 67 jours en accéléré équivalent à 7 ans *in situ* (+ 4 ans dans l'obscurité). Toutefois, cette relation ne s'applique pas à la fonction d'étanchéité de la membrane. En effet, après 60 jours de vieillissement accéléré, les membranes présentent une perméabilité proche de 30 à 40 l/m²/an alors qu'elle est de l'ordre de 0,1 l/m²/an pour la membrane vieillie naturellement (comparée à la fuite tolérée par l'Andra de quelques l/m²/an). Le test de vieillissement développé se révèle en fait très majorant vis-à-vis de la fonctionnalité de la membrane. Malgré tout, cette étude a montré l'importance du couplage oxydation et déformation dans la perte des performances de la membrane, comparée à l'oxydation ou la déformation seule, la sensibilité des joints.

Ainsi, cette étude vise à enrichir la connaissance du comportement de la membrane en service au Centre Manche afin de trouver des indicateurs de l'étanchéité plus représentatifs que la température de ramollissement, de mieux situer le vieillissement en service par rapport au vieillissement accéléré.

4. Prélèvements d'échantillons

Les prélèvements de membrane ont été réalisés en septembre 2005 (figure 4 et photos n°2 à 7). Après ouverture des fouilles à la mini-pelle mécanique, en prenant soin de séparer la terre végétale des matériaux grossiers sous-jacents (schistes), les sables sur membrane ont été dégagés manuellement afin de ne pas endommager la membrane. En fond de fouille, la soudure entre deux lés a été précisée, ce qui a permis d'élargir la fouille pour dégager l'échantillon entièrement ; le talutage de la fouille a été finalisé avec une pente de 1H/1V en laissant une bande de 50 cm à l'extérieur de la découpe de l'échantillon pour pouvoir souder la membrane de réparation avec un recouvrement de 20 cm minimum.

La membrane dégagée est apparue en parfait état ; aucune trace d'endommagement ou d'altération n'a été observée sur les deux prélèvements en fond de fouille. La membrane avait un aspect très compact, et adhérait parfaitement à la couche de sable sous-jacente, les matériaux des couches supérieures ayant comprimé la membrane dont le comportement plastique lui a permis de se mouler sur son support. L'absence de trace d'écoulement dans les sables sur membrane confirmait la non saturation de cette couche en cette fin d'été 2005. Enfin, lors de la découpe, les bords ne se sont pas ouverts et sont restés jointifs, confirmant l'absence de tensions sur la membrane.

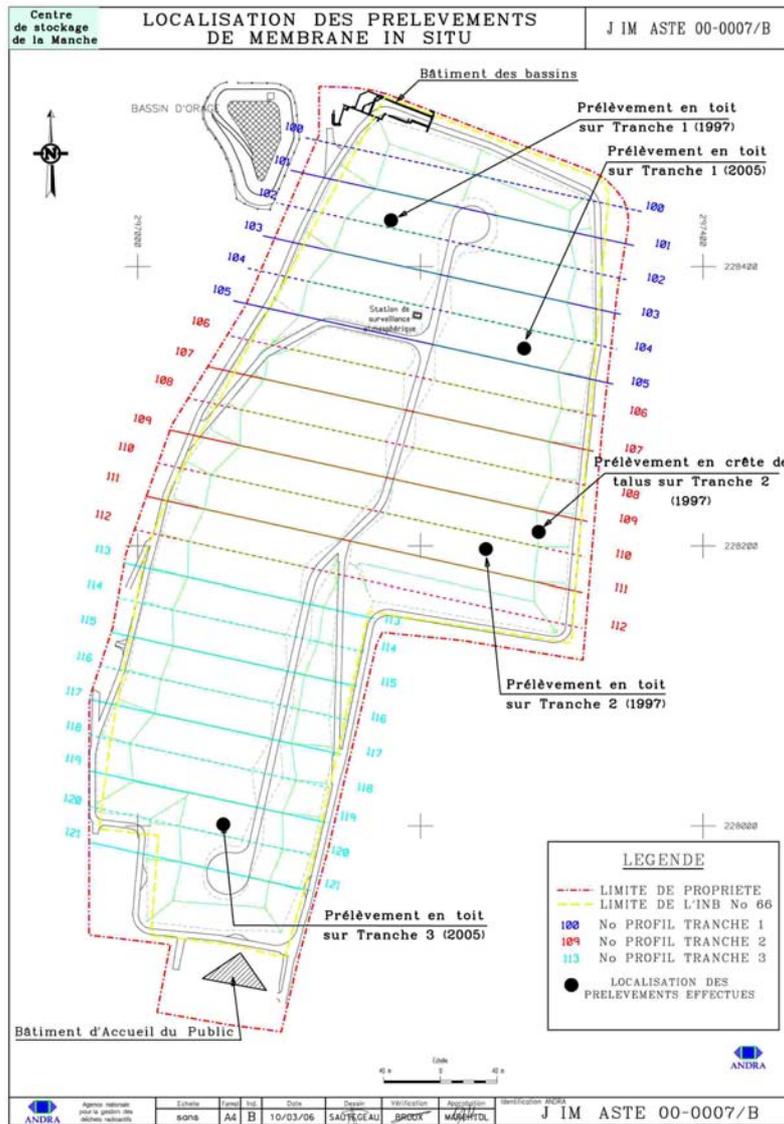


Figure 4. Localisation des prélèvements sur l'ouvrage



Photo n° 2 - Creusement de la couverture pour atteindre la membrane



Photo n° 3 - Préparation de la prise d'échantillon



Photo n° 4 - Découpage d'un échantillon de membrane



Photo n° 5 - Mise en place d'une membrane neuve

Les échantillons ont été tracés et découpés sur place, emballés dans des sacs étanches et mis séparément à plat dans des caisses en bois pour expédition aux laboratoires d'analyse.

Chaque morceau de réparation a été découpé (2,55 m x 3,0 m) sur la zone d'entreposage du rouleau de membrane neuve (parking goudronné), et transporté à plat sur un platelage jusqu'aux fouilles ; les morceaux de réparation ont été glissés en fond de fouille manuellement, puis soudés. Les contrôles des soudures par ultrasons n'ont révélé aucun défaut majeur de soudure, permettant ainsi la réception de la réparation.

Les matériaux ont été remis en place par couche de 30 cm et compactés à la plaque vibrante. La dernière couche de terre végétale a finalisé la remise en état de la couverture.



Photo n° 6 – Contrôle par ultrasons des soudures de géomembrane



Photo n° 7 – Mise en place du sable sur la géomembrane

5. Programme d'essais

Les essais retenus afin d'évaluer l'état de la géomembrane en place et son évolution éventuelle par rapport aux échantillons de référence sont de trois types :

- essais sur la géomembrane elle-même ;
- essais sur le liant extrait (au solvant) à partir de la géomembrane ; cette approche permet généralement pour ce type de membrane comportant une armature interne géotextile de mettre en évidence de manière plus sensible d'éventuelles évolutions des caractéristiques physico-chimiques liées au vieillissement alors que ces évolutions n'induisent encore aucun changement dans les caractéristiques mécaniques du produit (du fait de la présence de l'armature) ou dans ses caractéristiques hydrauliques du fait de sa forte épaisseur ;
- essais sur les joints soudés. Pour une géomembrane bitumineuse, la résistance mécanique d'une soudure réalisée par fusion partielle du liant bitumineux sur les faces des deux lés en contact est directement liée à la cohésion interne du liant bitume ; la valeur de la résistance en traction cisaillement peut donc permettre de mettre en évidence une évolution physico-chimique du liant bitumineux.

Le tableau 1 résume les essais pratiqués sur les divers types d'échantillons, ainsi que les méthodes d'essais utilisées ; la plupart de celles-ci sont classiques et normalisées, d'autres sont en cours de développement (spectrographie infra-rouge et essai BBR), d'autres sont récemment normalisées en tant que méthodes (souplesse basse température, éclatométrie (photo n°8)) mais n'ont pas été (ou peu) utilisées en tant qu'indicateur de vieillissement.

À noter que le programme a dû être optimisé en fonction de la dimension propre à chaque type d'échantillon ; ainsi sur les échantillons « témoins » il ne pouvait être effectué d'essais SBT (souplesse basse température) ou éclatométrie nécessitant des échantillons de dimension importante – dans ce cas la valeur de référence a été obtenue sur un échantillon de membrane neuve de même type, en connaissant les limites et les incertitudes propres à cette démarche.



Photo n° 8 - Essai d'éclatométrie

▪

6. RESULTATS D'ESSAIS

Tableau 1 - Programme et méthodes d'essais

		Echantillons						Méthode	Commentaires
		R	TR 1 (*)	TR 1 t (*)	TR 1 s (*)	TR 3 (*)	TR 3 t (*)		
1/ Géomembrane	1.1 Produit lui-même								
	- épaisseur	X	X	X		X	X		NFT 84 512 -1
	- masse surfacique	X	X			X			NFT 84 514
	- traction	X	X	X		X	X		NFT 84 501
	- poinçonnement statique	X	X			X			NFT 84 507
	- niveau étanchéité conventionnel		X						NFT 84 515
	- souplesse basse température	X	X			X			NFEN 1109
	- éclatométrie	X	X			X			PrEN 14 151
	1.2 Sur liant récupéré								
	- récupération par extraction au solvant	X	X	X		X	X		NF EN 12697-3
- spectrographie infra-rouge	X	X	X		X	X		Méthode LR Aix	
- température de ramollissement bille et anneau (TBA)	X	X	X		X	X		NFEN 1427	
- teneur en asphaltène	X	X	X		X	X		NF T 60115	
- essai BBR	X	X	X		X	X		NF EN 14771	
2/ Soudure	- facteur de soudure en traction / cisaillement				X		X	NFP 84 502-1	

* TR 1, TR 1 t, TR 1 s ; Tranche 1 – respectivement géomembrane prélevée sur le site / témoin de géomembrane conservé en atelier / soudure prélevée sur site – Idem pour tranche TR 3

Commentaires sur les méthodes d'essais :

1 : la récupération du liant se fait par extraction au tétrachloréthylène.

2 : spectrographe infra-rouge à transformée de Fourier 400-4000 cm⁻¹ ; analyse du pic carbonyle à 1700 cm⁻¹ et du pic sulfoxyde à 1030 cm⁻¹ (figure 5).

3 : pliage à 180° d'un échantillon de 5 cm de large entre un système de 2 rouleaux fixes et un troisième se déplaçant à la vitesse de 350 mm/min ; la température SBT est la température d'essai la plus basse occasionnant une fissuration.

4 : le principe est identique à celui de la norme mais l'appareillage est de grande dimension (650 mm de diamètre utile).

5 : permet de mesurer le fluage des liants bitumineux (flexion sur barreau en trois points) et d'évaluer le comportement (fragilité) à basse température.

Tableau 2. Résultats d'essais sur la géomembrane

	Unité	Origine des échantillons et résultats d'essais					Données certifiées ASQUAL VNAP/PRV (*)	Notes [2]	
		TR 1	TR 1 t	TR 3	TR 3 t	R [1]			
1. épaisseur	moyenne écart-type	mm mm	5,60 (0,20)**	5,40 [3]	5,45 (0,35)	5,0 [3]	6,05 (0,35)	5,6 (5,32 – 6,16)	[3]
2. masse surfacique	moyenne écart-type	g/m ²	6796 (256)		6346 (497)		6869 (208)	6250 (5781 – 6719)	
3. poinçonnement statique									
- déplacement à force maxi	moyenne/écart-type	mm	14 (2)		13 (1)		13 (1)	14 (>11,9)	
- résistance (force maxi)	moyenne/écart type	N	520 (57)		548 (51)		578 (37)	600 (>540)	
4. caractéristiques en traction									
- résistance sens production	moyenne/écart-type	kN/m	24,9 (1,5)	30,9 (3,2)	28,1 (1,8)	28,5 (1,9)	31,6 (2,1)	29 (≥ 21,75)	
- résistance sens travers	moyenne	kN/m	24,4 (3,2)		26,1 (3,2)		25,7 (1,1)	25 (≥ 18,75)	
- déformation force maxi									
- sens production	moyenne/écart-type	%	51 (3,3)	47 (4,6)	48 (6,9)	52 (1,5)	55 (10,9)	60 (≥ 48)	
5. caractéristiques en éclatométrie									
- caractéristiques au pic									
- pression maximale		kPa	101		80		74		
- déflexion		mm	156		111		99		
6. souplesse à basse température (SBT)		°C	22		33		48		[5]
7. Niveau d'étanchéité conventionnelle		m ³ /m ² /j	0,6.10 ⁻⁶				0,6 à 1.10 ⁻⁶		[3]

(*) VNAP = Valeur Nominale Annoncée par le Producteur –entre parenthèses PRV Plage Relative de Variation à 95%

(**) entre parenthèses : écart-type

Tableau 3. Résultats d'essais sur le liant bitumineux extrait de la géomembrane

	Unité	TR 1	TR 1 t	TR 3	TR 3 t	R	Notes
- température de ramollissement bille et anneau (TBA)	°C	117,5	128	114,5	129	121,5	
- spectrographie infra-rouge	indice carbonyle	2,7	4,9	2,8	5,3	3,4	
	indice sulfoxyde	4,5	7,8	6,9	4,7	5,3	[6]
- teneur en asphaltène	%	24,6	29	26,8	28,3	25,5	

Tableau 4. Résultats d'essais sur les soudures

	Unité	TR 1	TR 1 t	TR 3	TR 3 t	R	[7]
- résistance en traction cisaillement	kN/m	15,4		18,5		14,8	12
- résistance en traction de la géomembrane (référence)	kN/m	24,4		26,1		25,7	
- facteur de soudure	sans	0,63		0,70		0,58	0,80 [4]

Commentaires particuliers et renvois relatifs aux tableaux 2, 3 et 4

- [1] Commentaire général sur la référence R (mesurées sur un produit commercialisé actuellement)
Ces caractéristiques sont données à titre indicatif et elles sont à considérer avec prudence car sur un intervalle de 10/12 ans, les procédés de fabrication ont sensiblement évolué (fournisseur de l'armature géotextile, provenance du bitume et des charges fines); cela se traduit notamment par une TBA plus élevée, à savoir 121,5 °C au lieu de 109°C. Par ailleurs, un changement même relativement léger de l'armature géotextile peut entraîner des changements non négligeables des caractéristiques en traction et poinçonnement.
- [2] Nous donnons pour chaque caractéristique, la plage relative de variation (PRV) qui est tolérée par rapport à la valeur nominale annoncée par le fabricant (VNAP) dans le cadre du processus de certification ASQUAL des produits mais ceci n'a qu'un élément informatif car à l'époque, la certification n'existait pas, on n'a donc pas dans ce cas précis de VNAP pour le produit d'origine.
- [3] Pour les témoins, résultats donnés à titre indicatif car mesurés seulement sur éprouvettes d'essai de traction ; l'échantillonnage initial (« témoin ») a une surface trop faible pour permettre une mesure fiable compte tenu de leur forte dispersion propre à ce type de géomembrane bitumineuse.
- [4] pour les géomembranes à base de bitume oxydé, le facteur de soudure n'est pris en compte que si la résistance en cisaillement n'est pas conforme.
- [5] Plus la température est élevée, plus la membrane est sensible à la fissuration par pliage.
- [6] Donné à titre indicatif ; essai en cours de développement (figure 5).
- [7] Spécifications actuelles (ASQUAL) sur soudure neuve.

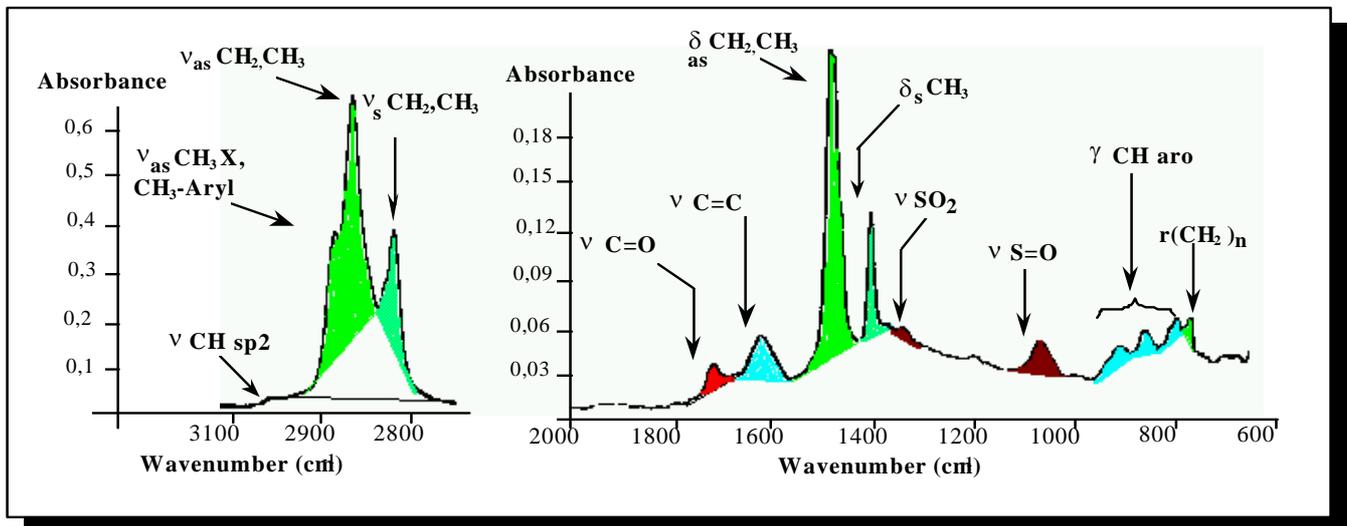


Figure 5 – Analyse infra-rouge

7. Commentaires sur les résultats

7.1. Examen des caractéristiques de la géomembrane elle-même

- Épaisseur : pas d'évolution significative
- Masse surfacique : pas d'évolution significative ; à noter comme d'ailleurs pour l'épaisseur que l'échantillon R transmis comme référence actuelle est dans le haut de la fourchette des valeurs certifiées pour ce produit
- Poinçonnement statique :
 - résistance un peu faible sur TR1 ; évolution à peine significative mais bien corrélée avec la faible diminution de la résistance en traction
 - déformation à la force maxi : aucune évolution.
- Caractéristiques en traction :
 - la résistance en sens production sur TR 1 présente une baisse sensible par rapport au témoin,
 - évolution de déformation à la force maxi non significative
- Niveau d'étanchéité : cet essai ne permet pas de mesurer les évolutions fines mais permet de montrer que le produit a une perméabilité 100 fois inférieure au seuil de définition d'une géomembrane.
- Souplesse (température de fissuration) : la géomembrane neuve actuelle n'est pas a priori équivalente à la valeur de référence de l'époque, car au sens de cet essai elle semble plus fragile que les échantillons du site (changement de nature de liant ?).
- Éclatométrie :
 - sur le plan mécanique les variations observées ne sont pas significatives d'un vieillissement - les échantillons du site sont plutôt meilleurs que la référence neuve actuelle
 - la perte d'étanchéité (à quelques pourcents de déformation) est habituellement observée pour ce type de matériaux et n'est pas significativement différente pour les échantillons neufs ou ceux du site.

7.2. Examen des caractéristiques physico-chimiques du liant extrait de la membrane

- Température de ramollissement bille et anneau (TBA) ; la TBA des échantillons prélevés sur le site est inférieure à celle des témoins ce qui signifie que le durcissement par oxydation semble avoir été plus important pour ces derniers que pour les échantillons prélevés sur l'ouvrage.
- Teneur en asphaltènes et indice de carbonyle ; même constat – les témoins semblent avoir plus vieilli que les échantillons du site car leur taux d'asphaltènes est sensiblement supérieur.

7.3. Examen des caractéristiques des soudures

- Traction-cisaillement

Les résistances des deux échantillons du site sont conformes et du même niveau que celles de la soudure neuve effectuée pour la réparation – aucun signe de vieillissement visible.

8. CONCLUSIONS

L'opération de prélèvement s'est très bien passée ; le prélèvement d'échantillons sur un ouvrage en service nécessite une organisation importante préalable pour optimiser la taille des échantillons en regard du programme d'essais et une grande prudence pour l'accès à la géomembrane sur site et pour effectuer les réparations après prélèvement.

De manière globale, l'état de la géomembrane prélevée sur l'ouvrage est très satisfaisant, que ce soit au niveau des caractéristiques mécaniques des produits et des soudures et physico-chimiques du liant. L'absence d'évolution significative et simultanée de plusieurs caractéristiques ne permet pas de mettre en évidence un vieillissement du produit et donc d'évaluer son évolution future.

Sur un plan méthodologique, les investigations physico-chimiques s'avèrent assez fines et ont pu montrer que les échantillons témoins conservés à l'air libre sous hangar se sont plus oxydés que les échantillons du site ; ces témoins pourraient représenter un stade d'évolution plus avancé, hypothèse que des investigations ultérieures devraient permettre d'évaluer.