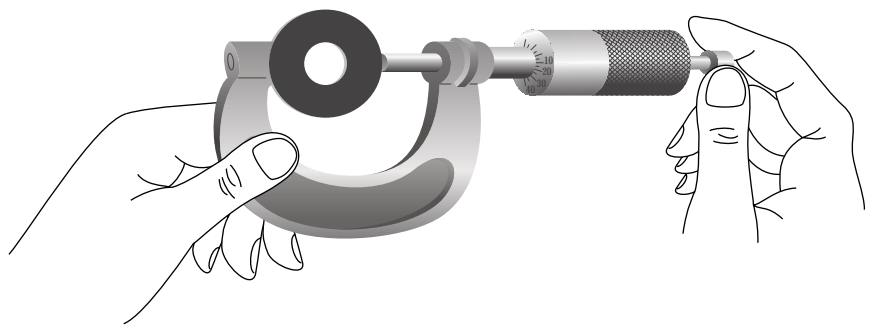




# Vespel®

Pièces et semi-produits en polyimide

## Manuel de conception



Innovez avec  
les polymères techniques  
de DuPont

\* Marque déposée de DuPont de Nemours



# Informations concernant la conception des pièces VESPEL®

## Table des matières

	Page		Page
<b>Introduction</b> .....	3	<b>Douilles et paliers</b> .....	33
Généralités.....	3	Le VESPEL® comparé aux autres matériaux	
Chimie.....	3	dans les applications de paliers.....	33
Procédés de fabrication.....	3	Choix de la matière.....	33
Influence de la direction sur les caractéristiques.....	3	Conception des paliers VESPEL®.....	35
Définition des besoins et établissement		Lubrification et autres remarques	
de spécifications significatives.....	4	sur la conception des paliers.....	37
Qualité.....	4	Paliers lubrifiés.....	40
<b>Compositions et propriétés</b> .....	5	<b>Segments d'étanchéité</b> .....	43
Guide de sélection.....	5	Intérêt des polyimides.....	43
Propriétés physiques.....	6	Glossaire des paramètres de conception.....	43
Influence de la température.....	11	Conception standard de segments	
ST super tenace.....	12	à coupe droite réalisés par formage direct.....	43
Courbes de contrainte-déformation.....	12	Autres remarques relatives à la conception.....	44
Fluage et relaxation des contraintes.....	14	Tolérances de conception.....	45
Influence de l'humidité.....	16	Segments d'étanchéité de conception spécifique.....	46
Dilatation thermique.....	17	<b>Annexes</b> .....	49
Résistance à la fatigue et au choc.....	18	A – Dimensions standard des semi-produits.....	49
Propriétés électriques.....	18	B – Tolérances ISO.....	50
Effet des produits chimiques.....	20	C – Fiche de sécurité produit.....	52
Autres propriétés.....	22	<b>Liste des tableaux et figures</b> .....	48
<b>Formage direct</b> .....	23		
Pièces réalisées par «formage direct».....	23		
Remarques relatives à la conception.....	26		
Pièces réalisées par «formage direct»			
et reprises par usinage.....	27		
Pièces usinées.....	27		
Procédures d'usinage.....	28		
Collage.....	31		
Surmoulage et revêtement.....	31		
Résistance aux radiations.....	31		



# Introduction

## Généralités

Des innovations récentes au niveau du produit et du développement, ainsi que des techniques de fabrication, ont conduit à la naissance d'une nouvelle famille de produits polyimides. Ces derniers apportent à l'ingénieur d'études des solutions pratiques et rentables aux problèmes complexes posés par les applications soumises à des températures élevées.

Commercialisés depuis plus de 20 ans, les pièces et les semi-produits en VESPEL® sont particulièrement adaptés aux applications dont les éléments mécaniques requièrent stabilité dimensionnelle, propriétés électriques et résistance à l'usure et au frottement.

Pour encore plus de résistance et de ténacité, la famille VESPEL® ST s'ajoute aujourd'hui à ces produits semi-cristallins. La principale différence entre les polyimides VESPEL® ST et SP réside dans l'absence de structure cristalline pour les premiers.

A partir de ces résines polyimides, DuPont fabrique des pièces correspondant exactement aux caractéristiques définies par ses clients, ainsi que des semi-produits pour l'usinage des prototypes et des petites séries.

Etant donné la concurrence exacerbée qui règne actuellement sur les marchés, le rôle de l'ingénieur d'études est essentiel, aussi bien en termes de conception de nouveaux produits que d'amélioration des anciens. Comme toutes les pièces en matière plastique, les pièces en VESPEL® sont gouvernées par les mêmes règles de bonne conception et les mêmes lois physiques que les autres matériaux. Ce manuel a donc pour objectif d'aider les concepteurs à appliquer ces principes à la sélection, le test et la caractérisation des pièces en VESPEL®.

Le présent manuel de conception comprend des informations exhaustives sur les propriétés physiques et les performances des résines polyimides SP et ST servant à la fabrication des pièces VESPEL®. Le choix des informations est fondé en partie sur les échanges que nous avons eus avec les ingénieurs d'études de nos clients concernés par les applications de ces pièces. Toutes les données figurant dans les pages suivantes résultent de recherches intensives sur les propriétés physiques, effectuées dans les laboratoires DuPont de Wilmington, Delaware\* (Etats-Unis). Néanmoins, il est toujours recommandé d'effectuer des essais dans les conditions finales d'utilisation.

A l'heure actuelle, les pièces VESPEL® sont fabriquées à Newark (Etats-Unis), Utsunomiya (Japon) et Mechelen (Belgique).

## Chimie

### Polymère

Le VESPEL® est un polyimide de condensation produit à partir de dianhydride pyromellitique (PMDA) et de 4,4' diamino-diphényl éther (ODA).

Polyimide SP

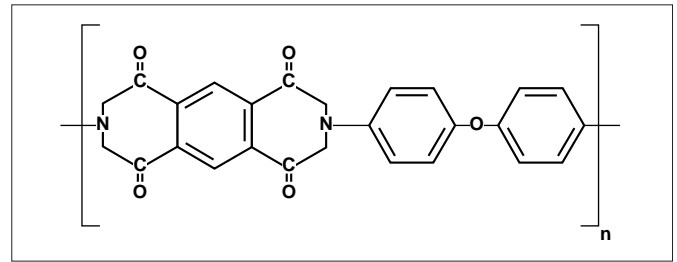


Fig.1 Formule chimique du VESPEL® SP

Le VESPEL® n'a pas de température de transition vitreuse ou point de fusion observable en deçà d'une température de décomposition largement supérieure à 400°C.

Il s'agit là d'une caractéristique essentielle de ses performances, qui en l'occurrence sont identiques à celles des plastiques thermodurcissables.

La principale différence entre la résine polyimide dite SP et la nouvelle dite ST réside dans la structure cristalline. Les résines SP types ont une teneur cristalline dans une proportion estimée de 25 à 50%.

Cette teneur est négligeable, voire inexistante, pour les résines ST. Le spectre infrarouge de ces dernières montre en revanche qu'elles contiennent 100% d'imides amorphes contre 40% pour les résines SP.

## Procédés de fabrication

DuPont réalise des pièces de précision VESPEL® au moyen de plusieurs procédés de fabrication. Le procédé retenu dans un cas précis dépend d'un certain nombre de critères: conditions finales d'utilisation, caractéristiques définies par le client, géométrie de la pièce et facteurs économiques.

Les petites séries et les pièces de grandes dimensions et/ou de forme complexe sont en général produites par usinage de barres, de tubes ou de plaques. Ainsi, toutes les techniques standard du travail des métaux sont-elles utilisables et ce, en respectant des tolérances très serrées.

Dans le cas des grandes séries, et lorsque la géométrie de la pièce le permet, le formage direct, technique similaire à celle que l'on emploie dans la métallurgie des poudres, permet de produire des pièces à un coût considérablement inférieur à celui des pièces usinées. Lorsque, pour des raisons de tolérance ou de complexité, le formage direct seul ne convient pas, il est souvent accompagné d'un usinage de finition.

## Influence de la direction sur les caractéristiques

A l'instar de la plupart des matières plastiques, le VESPEL® fait montre d'anisotropie: ses propriétés varient en fonction de la direction de la force exercée pendant la fabrication. C'est ainsi, par exemple, que les caractéristiques mécaniques telles que la résistance à la traction et l'allongement sont plus élevées et que la dilatation thermique est plus réduite dans le plan perpendiculaire ( $\perp$ ) à la direction de la force appliquée lors du moulage que dans la direction parallèle ( $\parallel$ ) à cette force.

Les pièces VESPEL® usinées à partir de semi-produits ne présentent pas cette caractéristique.

® Marque déposée de DuPont de Nemours.

\* Actuellement indiquées avec référence aux méthodes ASTM, les valeurs le seront conformément aux spécifications ISO dans la prochaine version du Guide de conception.

Les propriétés caractéristiques des pièces usinées ont été obtenues à partir d'éprouvettes de matériau isotropique. Ce dernier est formé de sorte que les propriétés restent uniformes indépendamment de la direction.

Lors du formage direct, la pression est appliquée suivant une direction verticale, avec pour résultat une légère anisotropie des caractéristiques mécaniques. L'ajout de charges accroît cet effet directionnel. Pour la plupart des pièces, le maximum de résistance et d'allongement et le minimum de dilatation thermique sont constatés perpendiculairement à la direction du pressage. Les données présentées ici pour les pièces réalisées par formage direct, à l'exception des propriétés de compression et de conductivité thermique, ont été mesurées perpendiculairement à la direction.

Il est très important, lors des essais du VESPEL® pour une application, d'employer le matériau (semi-produit ou formage direct) qui sera utilisé pour la commercialisation. Pour cette raison, DuPont propose des ébauches cylindriques réalisées par formage direct pour les prototypes.

## Définition des besoins et établissement de spécifications significatives

En principe, l'établissement des spécifications succède à plusieurs autres étapes clés de la mise au point d'une application. La première étape du processus, absolument nécessaire, consiste à définir les conditions d'utilisation finales.

Logiquement viennent ensuite l'esquisse du dessin préliminaire, la réalisation des prototypes et les essais du modèle. La rédaction des spécifications intervient seulement lorsque ces étapes ont été franchies de manière satisfaisante.

L'objet des spécifications consiste à éliminer toute variation significative des pièces qui serait contraire aux critères fonctionnels et économiques définis lors des étapes précédentes. Fruit de la collaboration étroite entre l'utilisateur final et le constructeur, les spécifications dressent la liste complète des conditions à remplir pour que les pièces finies soient acceptables.

Les différentes techniques de fabrication des pièces VESPEL® permettent de répondre avec souplesse aux spécifications des clients.

Lors de la conception, l'ingénieur d'études ne doit jamais oublier que les pièces en plastique requièrent en général des tolérances plus élevées que les pièces métalliques.

Ce guide présente des valeurs types pour les propriétés caractérisant les pièces produites par formage direct et par usinage. Ces valeurs étant des moyennes, il est conseillé de ne pas se référer aux valeurs maximales pour l'établissement des spécifications.

## Qualité

DuPont fabrique des pièces en VESPEL® sur mesure pour répondre aux contraintes rigoureuses de qualité des constructeurs d'équipement les plus exigeants du monde et ce, pièce après pièce, commande après commande. Comparées aux méthodes de contrôle classiques, nos procédures de contrôle statistique de la qualité en cours de fabrication nous permettent de produire à coût moindre des pièces d'un niveau élevé et constant de qualité. La précision de ce contrôle statistique est telle que certains clients suppriment leurs propres opérations d'inspection à la réception des pièces, réalisant ainsi des économies substantielles.

Ces procédures comprennent un contrôle laser et une analyse vidéo pilotée par ordinateur pour la vérification des tolérances dimensionnelles et de l'uniformité, ainsi qu'un contrôle par ultrasons pour tester l'intégrité du matériau.

Toutes les informations relatives à chaque commande étant mémorisées, il est possible de remonter, le cas échéant, du produit fini à la résine d'origine.

### Tous les sites de production de VESPEL® sont certifiés ISO 9001 et QS 9000.

Pour preuve de l'engagement de qualité de DuPont, le site de Mechelen a été couronné par deux fois du «Ford Q1 Awards», a reçu la distinction «Chrysler Penta Star» et a été désigné «fournisseur privilégié» par la société Rolls Royce Aero Engines Company.

Dans le monde entier, DuPont a mis en place un système de gestion «Qualité totale» pour garantir une qualité supérieure à tous les niveaux. Pour ce qui concerne les pièces, c'est une garantie de qualité, de la matière première à la pièce finie livrée au client en temps et en heure.

Le principe de DuPont en matière de production de qualité consiste à éliminer les erreurs plutôt que les tâches. Nous nous sommes engagés à des améliorations constantes conformément aux directives Ford Q1, VDA (Verband der Automobilindustrie E.V.), de même qu'à répondre à toutes les exigences formulées par nos clients.

A cet effet, nous faisons appel aux outils suivants:

- FMEA Failure Mode Error Analysis (Analyse des défaillances);
- SPC Statistical Process Control (Contrôle statistique des procédés);
- RMI Raw Material Inspection (Contrôle de la matière première);
- PITA Production and Inspection Tool Administration (Administration des outils de production et de contrôle).

Le Manuel Qualité, régulièrement mis à jour, récapitule tous les postes impliqués en la matière.

## Composition et propriétés

Les pièces de précision en VESPEL® sont disponibles en plusieurs compositions standard et spéciales, dont certaines sont chargées pour améliorer les performances du polyimide au niveau d'une ou deux caractéristiques clés.

Le graphite, par exemple, réduit le coefficient de frottement et l'usure, et le fluoropolymère TEFLON® diminue le coefficient de frottement statique ou l'abrasion en contact avec des métaux doux. Le tableau ci-après présente brièvement les compositions standard de DuPont.

### Guide de sélection

#### VESPEL® SP pour les applications exigeantes

Grades	Applications types	Compositions du polyimide
SP1	Pièces mécaniques et électriques soumises à des températures élevées. Sièges de vanne, joints, isolateurs.	Résine de base non chargée. Résistance et allongement maximaux, module et conductivité thermique minimaux, propriétés électriques optimales.
SP21	Applications nécessitant frottement et usure faibles, avec ou sans lubrification. Sièges de vanne, joints, paliers, rondelles de butée, segments d'étanchéité.	15% de graphite (en poids). Renforcement de la résistance à l'usure intrinsèque et amélioration de la stabilité thermique à long terme.
SP22	Applications pour lesquelles une dilatation thermique faible est plus importante que la résistance (légèrement réduite). Paliers (douilles, rondelles de butée, etc.)	40% de graphite (en poids). Coefficient de dilatation thermique réduit. Résistance maximale au fluage.
SP211	Applications nécessitant frottement et usure faibles dans des milieux à température et PV modérés. Paliers (douilles, rondelles de butée, etc.)	15% de graphite et 10% de résine fluorocarbonée TEFLON® (en poids). Frottement statique le plus faible.
SP3	Applications résistant au frottement et à l'usure sous vide ou dans des gaz inertes. Paliers, segments de piston et joints.	15% de MoS <sub>2</sub> – bisulfure de molybdène (en poids). Meilleures performances de résistance à l'usure en milieu sec.
SP221	Applications nécessitant frottement et usure faibles dans des conditions non lubrifiées en contact avec des métaux doux tels que l'aluminium, le cuivre et le bronze. Paliers (douilles, rondelles de butée, etc.)	40% de graphite (en poids) et 15% de résine fluorocarbonée TEFLON®. Plus faible usure en frottement sec contre des métaux doux.
SP262	Applications pour lesquelles une dilatation thermique et un coefficient de frottement faibles sont plus importants que la résistance. Paliers.	57% de graphite (en poids) et 5% de fibres de carbone. Plus faible coefficient de dilatation thermique et plus grande conductivité thermique.

**VESPEL® ST : pour relever des défis encore plus grands, les grades ST apportent plus de ténacité, de résistance et de tenue aux températures élevées**

<b>Grades</b>	<b>Applications types</b>	<b>Compositions du polyimide</b>
ST2010	Applications nécessitant frottement et usure faibles, avec ou sans lubrification. Sièges de vanne, joints, paliers, rondelles de butée, segments d'étanchéité.	Excellentes propriétés de tenue à l'usure et au frottement, combinées à de bonnes propriétés de ténacité, de résistance et d'isolation. Contient 10% de graphite. Allongement maximal.
ST2030	Applications pour lesquelles une dilatation thermique faible est plus importante que la résistance (légèrement réduite). Paliers (doublés, rondelles de butée, etc.).	Coefficient de dilatation thermique et allongement inférieurs à ceux du ST 2010. Contient 30% de graphite. Stabilité thermique et tenue à l'oxydation les plus élevées.

Nous espérons que vous trouverez dans cette brochure des idées d'application du VESPEL® vous permettant de relever les défis techniques qui sont les vôtres. Pour de plus amples informations, ou pour tout commentaire, veuillez contacter votre représentant DuPont local avant de commencer la conception. Nous serons heureux de vous fournir toutes les informations nécessaires sur les pièces réalisées par formage direct, sur des applications similaires et sur les moyens d'obtenir les matières VESPEL® pour les essais et les prototypes.

### **Propriétés physiques**

Les pièces de précision VESPEL®, réalisées à partir des résines polyimides de DuPont, se caractérisent par une combinaison unique de propriétés physiques, qui ajoutent une nouvelle dimension aux matières plastiques techniques actuellement disponibles. Ces propriétés sont les suivantes: plage de fonctionnement en continu depuis les températures cryogéniques jusqu'à 500°C pour de nombreuses applications; températures en service continu jusqu'à 300°C dans l'air; produits PV très élevés (limites de pression-vitesse à sec jusqu'à 12 MPa · m/s, voire plus avec lubrification), propriétés requises pour les applications de paliers; rigidité diélectrique élevée; excellente résistance mécanique et aux solvants; faible dégazage et résistance élevée aux radiations ionisantes. Ces propriétés sont récapitulées dans les tableaux 1, 2, 3 et 4. Les tableaux et graphiques des pages suivantes fournissent des informations spécifiques détaillées.



**Tableau 1 Récapitulatif des propriétés caractéristiques des résines polyimides**

Propriétés	Temp. °C	Méthode ASTM	Unités	SP1		SP21		SP22		SP211		SP3		
				U	FD	U	FD	U	FD	U	FD	U		
Résistance à la traction, point de rupture	23	D1708	MPa	86,2	72,4	65,5	62,0	51,7	48,3	44,8	51,7	58,5		
	260	E8†		41,4	36,5	37,9	30,3	23,4	26,2	24,1	24,1			
Allongement, point de rupture	23	D1708	%	7,5	7,5	4,5	5,5	3,0	2,5	3,5	5,5	4,0		
	260	E8†		6,0	7,0	3,0	5,2	2,0	2,0	3,0	5,3	–		
Résistance à la flexion, point de rupture	23	D790	MPa	110,3	82,7	110,3	82,7	89,6	62,1	68,9	68,9	75,8		
	260			62,1	44,8	62,0	48,3	44,8	37,9	34,5	34,5	39,9		
Module d'élasticité en flexion	23	D790	MPa	3102	2482	3792	3171	4826	4826	3102	2758	3275		
	260			1724	1448	2551	1792	2758	2758	1379	1379	1862		
Contrainte de compression à 1% de déformation	23	D695	MPa	24,8	24,1*	29,0	22,8*	31,7	24,1	20,7	14,5*	34,5		
				à 10% de déformation	133,1	112,4*	133,1	104,8*	112,4	93,8*	102,0	75,8*	127,6	
				à 0,1% de déformation rémanente	51,0	33,1*	45,5	33,8*	41,4	25,5*	37,2	27,6*		
Module de compression	23	D695	MPa	2413	2413*	2895	2275*	3275	2654*	2068	1379*	2413		
Fatigue axiale, limite d'endurance à 10 <sup>3</sup> cycles	23		MPa	55,8		46,2	–	–	–	–	–	–		
				260	26,2	22,8	–	–	–	–	–	–		
	à 10 <sup>7</sup> cycles			23	42,1	32,4	–	–	–	–	–	–		
				260	16,5	16,5	–	–	–	–	–	–		
Fatigue en flexion, limite d'endurance à 10 <sup>3</sup> cycles	23		MPa	65,5		65,5	–	–	–	–	–	–		
				à 10 <sup>7</sup> cycles	44,8	44,8	–	–	–	–	–	–		
Résistance au cisaillement	23	D732	MPa	89,6		77,2								
Résistance au choc Izod, avec entaille	23	D256	J/m	42,7		42,7						21,3		
Résistance au choc Izod, sans entaille	23	D256	J/m	747		320						112		
Coefficient de Poisson	23			0,41		0,41								
USURE ET FROTTEMENT	Vitesse d'usure ††			m/s×10 <sup>-10</sup>		17-85	17-85	6,3	6,3	4,2	4,2	4,9	4,9	17-23
	Coefficient de frottement**													
	PV = 0,875 MPa·m/s			0,29	0,29	0,24	0,24	0,30	0,30	0,12	0,12	0,25		
	PV = 3,5 MPa·m/s			–	–	0,12	0,12	0,09	0,09	0,08	0,08	0,17		
	Sous vide			–	–	–	–	–	–	–	–	0,03		
Statique, dans l'air			0,35	–	0,30	–	0,27	–	0,20	–	–			
THERMIQUES	Coefficient de dilatation thermique linéaire	23–260	D696	µm/m/°C	54	50	49	41	38	27	54	41	52	
		–62 à +23				45		34						
	Conductivité thermique	40		W/m °C	0,35	0,29*	0,87	0,46*	1,73	0,89*	0,76	0,42*	0,47	
	Chaleur spécifique			J/kg/°C	1130									
	Déformation sous charge de 14 MPa	50	D621	%	0,14	0,20	0,10	0,17	0,08	0,14	0,13	0,29	0,12	
Température de fléchissement sous charge de 2 MPa		D648	°C	–360		–360								

Toutes les informations ci-dessus sont soumises à la limitation de responsabilité imprimée au dos de cette brochure.

**Tableau 2 Récapitulatif des propriétés caractéristiques des résines polyimides**

Propriétés	Temp. °C	Méthode ASTM	Unités	SP1		SP21		SP22		SP211		SP3	
				U	FD	U	FD	U	FD	U	FD	U	
ÉLECTRIQUE	Constante diélectrique	23	D150										
	à 102 Hz			3,62	–	13,53	–	–	–	–	–	–	
	à 104 Hz			3,64	–	13,28	–	–	–	–	–	–	
	à 106 Hz			3,55	–	13,41	–	–	–	–	–	–	
	Facteur de pertes	23	D150										
	à 102 Hz			0,0018	–	0,0053	–	–	–	–	–	–	
	à 104 Hz			0,0036	–	0,0067	–	–	–	–	–	–	
	à 106 Hz			0,0034	–	0,0106	–	–	–	–	–	–	
	Rigidité diélectrique instantanée, épaisseur 2 mm		D149	MV/m	22	–	9,84	–	–	–	–	–	–
	Résistivité transversale	23	D257	$\Omega \cdot m$	$10^{14}$ - $10^{15}$	–	$10^{12}$ - $10^{13}$	–	–	–	–	–	–
Résistivité superficielle	23	D257	$\Omega$	$10^{15}$ - $10^{16}$	–	–	–	–	–	–	–	–	
DIVERSES	Absorption d'eau		D570	%									
	24 h	23			0,24	–	0,19	–	0,14	–	0,21	–	0,23
	48 h	50			0,72	–	0,57	–	0,42	–	0,49	–	0,65
	à l'équilibre, 50% RH				1,0-1,3	1,0-1,3	0,8-1,1	0,8-1,1	–	–	–	–	–
	Masse spécifique		D792		1,43	1,34	1,51	1,42	1,65	1,56	1,55	1,46	1,60
Indice limite d'oxygène		D2863	%	53	–	49	–	–	–	–	–	–	

† Eprouvettes de traction usinées selon D-1708 et éprouvettes par formage direct obtenues selon figure 19 de E-8 (barreau standard pour produits métallurgiques en poudre); éprouvettes testées selon D-638.

\* Les propriétés obtenues par formage direct (FD) marquées d'un astérisque ont été mesurées parallèlement à la direction du formage. Toutes les autres propriétés obtenues par formage direct ont été mesurées perpendiculairement à la direction du formage. Les propriétés obtenues par usinage (U) ne sont pas directionnelles.

†† Non lubrifié, dans l'air (PV 0,875 MPa · m/s).

\*\* En régime permanent, non lubrifié, dans l'air.

U: Pièces usinées dans des «semi-produits».

FD: Pièces obtenues par procédé de « Formage direct».

**Tableau 3 Propriétés caractéristiques préliminaires des nouvelles résines polyimides VESPEL® SP**

	Temp. °C	Méthode ASTM	Unités	SP221	SP262	
MÉCANIQUES	Résistance à la traction, point de rupture	23 260	D638 (E8)	MPa	38,6 37,9 19,3	
	Allongement, point de rupture	23 260	D638 (E8)	%	3,5 1 0,7	
	Résistance à la flexion, point de rupture	23 260	D790	MPa	55,1 31	
	Module d'élasticité en flexion	23 260	D790	MPa	3445 2205	
	Module d'élasticité en traction	23 260	D638 (E8)	MPa		8410 3720
	Contrainte de compression		D695	MPa		
	point de rupture	23			111,7	100
	point de rupture	260			57	59
	à 1% de déformation	23			14,5	40
	à 1% de déformation	260			7,6	21,4
	à 10% de déformation	23			78,6	
	à 10% de déformation	260			46,5	
	Module de compression	23 260	D695	MPa	1412 790	2860 1790
	Masse spécifique		D732		1,6	1,74
	Limite PV			MPa · m/s	10,5	10,5
	Coefficient de frottement					
	PV = 0,875 MPa · m/s					0,10-0,14
	PV = 3,5 MPa · m/s					0,05-0,08
	USURE ET FROTTEMENT	Facteur d'usure				
PV = 0,875 MPa · m/s				mm <sup>3</sup> /Nm × 10 <sup>-6</sup>	0,44	
PV = 3,5 MPa · m/s					0,66	
Usure et frottement contre de l'aluminium forgé 6061						
PV = 0,875 MPa · m/s		Coefficient de frottement			0,21	
PV = 0,875 MPa · m/s		Taux d'usure VESPEL® / métal	mm/s 10 <sup>-6</sup>		2,3 / 0	
Usure et frottement contre de l'aluminium moulé ADC 12						
PV = 0,5 MPa · m/s		Coefficient de frottement			0,15	
PV = 0,5 MPa · m/s		Taux d'usure VESPEL® / métal	mm/s 10 <sup>-6</sup>		1,2 / 0	
PV = 4,7 MPa · m/s		Coefficient de frottement			0,12	
PV = 4,7 MPa · m/s	Taux d'usure VESPEL® / métal	mm/s 10 <sup>-6</sup>		3,7 / 0,3		
THERMIQUES	Coefficient de dilatation thermique linéaire		D696	µm/m · °C		
	Perpendiculaire	23-300			29	
	Parallèle	23-300				13,1 48,9
	Conductivité thermique	23 200		W/m · K		2,46 1,98
	Chaleur spécifique	23 40		J/kg · K		792 837

Toutes les informations ci-dessus sont soumises à la limitation de responsabilité imprimée au dos de cette brochure.

**Tableau 4 Propriétés caractéristiques des pièces VESPEL® ST formées directement**

	Temp. °C	Méthode ASTM	Unités	ST2010	ST2030	
<b>MÉCANIQUES</b>	Résistance à la traction	D638	MPa	23	68	
				150	49	
				260	32	
				300	26	
	Allongement	D638	%	23	10,0	4,9
				150	10,0	
				260	9,8	
				300	9,7	
	Module d'élasticité en traction	23	D638	MPa	2758	3930
	Résistance au choc Izod, avec entaille	23	D256	J/m	53	
Contrainte de compression	23	D695	MPa			
				1 % de déformation	15	
				10% de déformation point de rupture	82 269	155
Module de compression	23	D695	MPa	1827	1207	
<b>ÉLECTRIQUES</b>	Rigidité diélectrique	23	D149	kV/mm	10,4	
	Constante diélectrique	23	D150			
				100 Hz	4,80	300
				10 kHz	4,78	110
				1 MHz	4,70	40,6
	Facteur de pertes	23	D150			
				100 Hz	0,0014	6,90
				10 kHz	0,0023	0,65
				1 MHz	0,0075	0,30
	Résistivité transversale	23	D257	ohm·cm	$3,2 \times 10^{16}$	$4,8 \times 10^7$
Résistivité superficielle	23	D257	ohm	$2,0 \times 10^{16}$	$2,6 \times 10^6$	
Conductivité thermique	23	F433	[W · cm/cm <sup>2</sup> · °C] × 10 <sup>-3</sup>	5,0	9,7	
Coefficient de dilatation thermique linéaire 23-260		D696	μ/m/°C	48	32	
<b>DIVERSES</b>	Absorption d'eau, % de variation (poids)	23	D570			
				24 h	1,3	0,5
				48 h	3,1	1,3
	Déformation sous charge	23	D621	%	0,18	
50					0,38	
Masse spécifique	23	D272		1,38	1,44	

**Remarque:** il n'y a pas encore de semi-produits en VESPEL® ST.

## Influence de la température

Les polyimides SP et ST ne fondent pas et n'ayant pas de température de transition vitreuse ( $T_g$ ) ou point de ramollissement selon les mesures effectuées par les méthodes usuelles, la résistance et le module décroissent en fonction de la température d'une manière quasi linéaire. Cela contraste avec les thermoplastiques techniques habituels qui montrent une diminution importante de ces propriétés à l'approche de la température de transition  $T_g$ . Les figures 2 à 5 illustrent les

variations types de résistance à la traction et du module d'élasticité en fonction de la température pour des pièces usinées et réalisées par formage direct.

La température maximale d'utilisation des polyimides SP et ST est limitée par leur vitesse de dégradation, non par un point de ramollissement auquel ils perdraient leur capacité de charge admissible. Les pièces peuvent être utilisées en continu dans l'air jusqu'à 300°C et par intermittence jusqu'à 500°C.

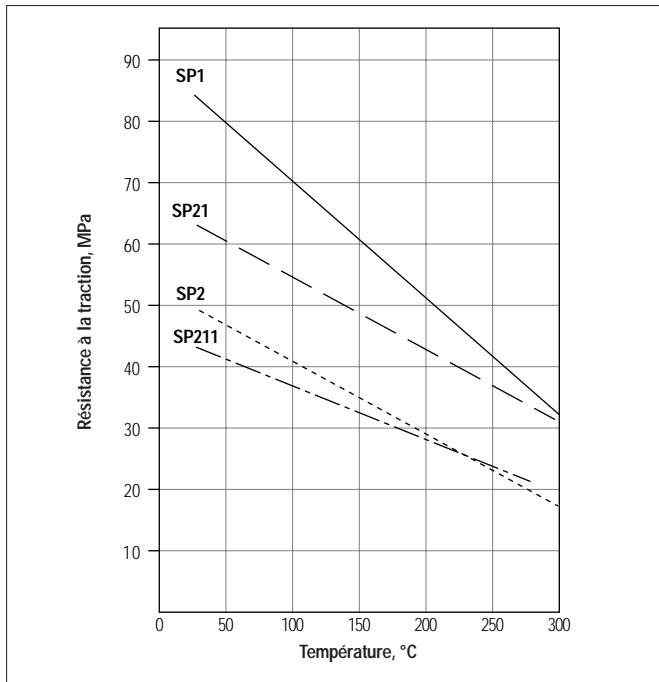


Fig. 2 Semi-produits polyimide SP: influence de la température sur la résistance à la traction au point de rupture (ASTM D1708)

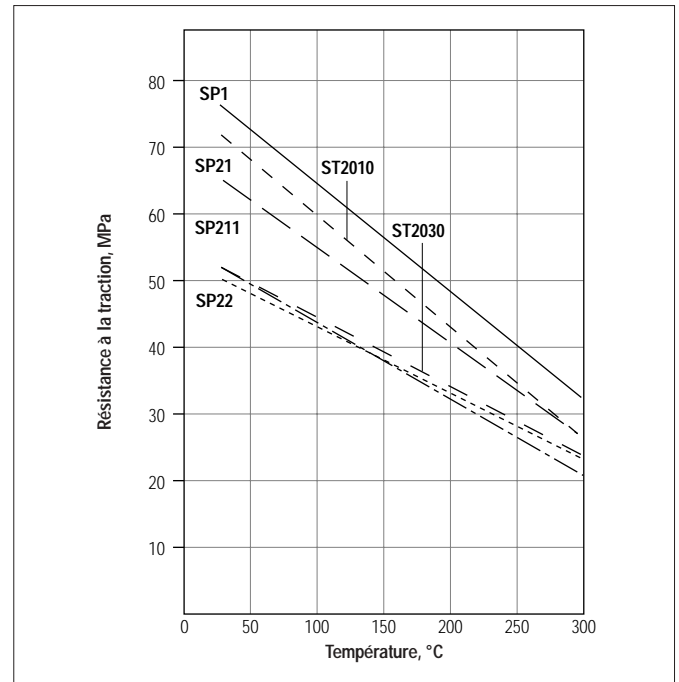


Fig. 3 Polyimides SP et ST formés directement: influence de la température sur la résistance à la traction au point de rupture (ASTM E8)

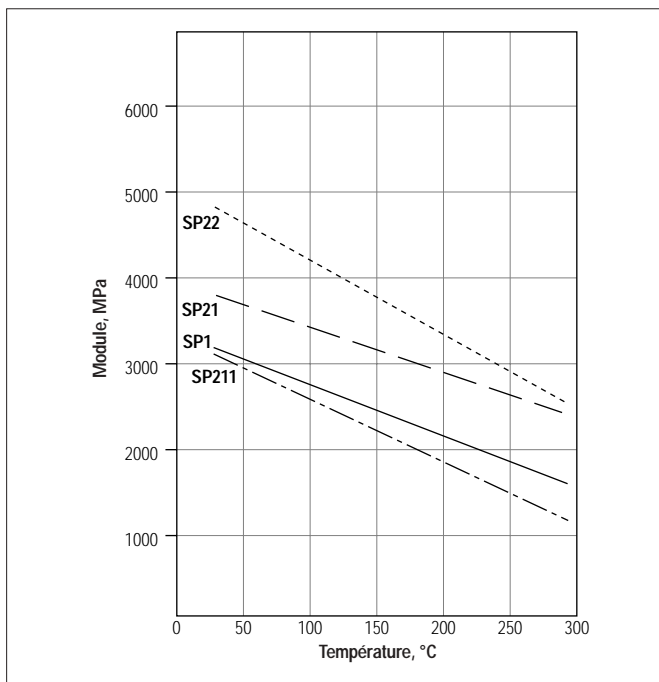


Fig. 4 Semi-produits polyimide SP: influence de la température sur le module d'élasticité type (module d'élasticité en flexion) – ASTM D740

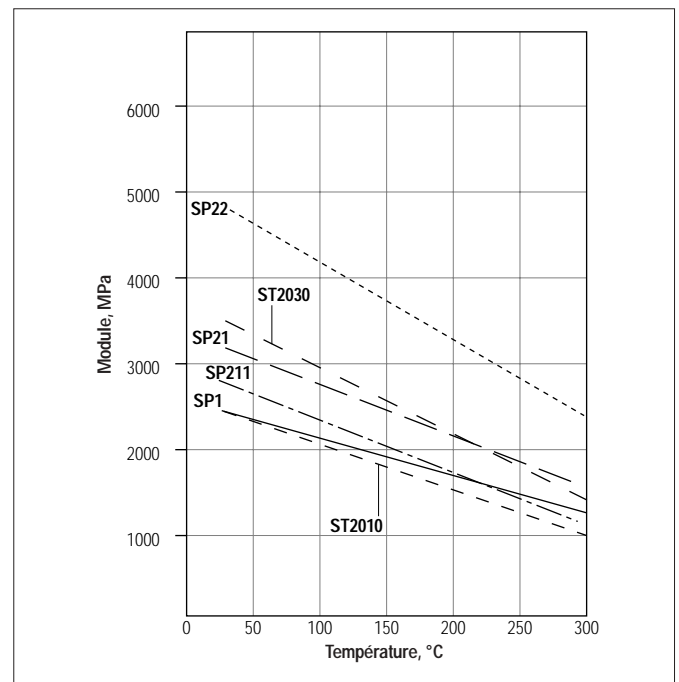


Fig. 5 Polyimides SP et ST formés directement: influence de la température sur le module d'élasticité type (module d'élasticité en flexion) – ASTM D790

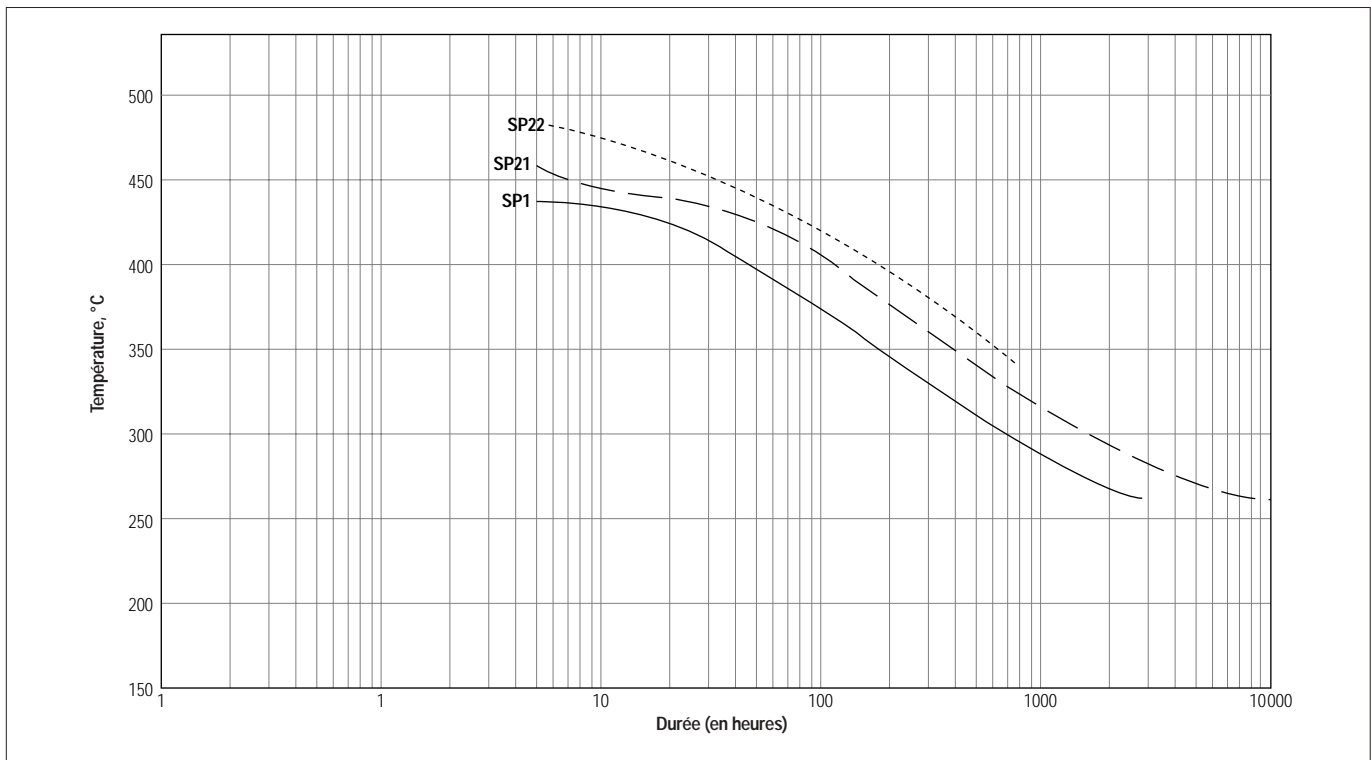


Fig. 6 Exposition à l'air du polyimide SP aux températures élevées. Influence de la température sur la durée approximative conduisant à 50% de réduction de la résistance à la traction

La figure 6 montre la durée conduisant, aux hautes températures, à 50% de réduction de la résistance à la traction initiale. Par exemple, après 100 heures d'exposition en continu à l'air à 370°C, le polyimide SP1 conserve la moitié de sa résistance initiale. La charge de graphite ajoutée aux polyimides SP21 et SP22 apporte aux pièces une certaine stabilité physique, qui se manifeste par une meilleure conservation des propriétés dans le temps. En effet, pour atteindre le niveau de résistance de 50%, il faut environ 200 heures d'exposition à 370°C pour le SP21 (15% de graphite) et 350 pour le SP22 (40% de graphite). La perte de propriétés dans le temps à des températures s'élevant jusqu'à 400°C est due principalement à la dégradation par oxydation. A des températures s'élevant jusqu'à au moins 340°C, les pièces en SP opèrent dans des milieux inertes (azote, par exemple) ou sous vide avec une perte négligeable de leurs propriétés dans le temps.

Evidemment, les données de la figure 6 ne doivent être prises en compte qu'à titre indicatif, puisque la durée de vie utile en service des pièces VESPEL® est en général beaucoup plus longue. Et cela, parce que les températures sont plus souvent intermittentes que continues et que les pièces sont en général protégées dans une certaine mesure par un carter ou un logement. Il est rare que les pièces VESPEL® soient totalement exposées à l'air dans des applications impliquant des températures élevées.

## ST super tenace

### • Meilleure tenue à la température

Les propriétés mécaniques des pièces en VESPEL® ST sont si bonnes qu'elles conservent plus longtemps leur niveau fonctionnel de ténacité et de résistance aux hautes températures que les pièces en SP.

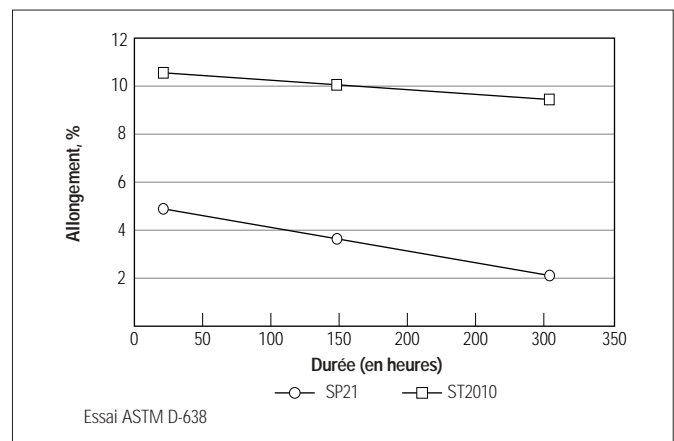


Fig. 7 Influence de la température sur l'allongement à la rupture du SP21 et du ST2010

### • Ténacité supérieure

Les pièces en VESPEL® ST présentent une propriété d'allongement double de celle des pièces SP antérieures (figure 7). La résistance au choc (Izod, avec entaille) est environ 50% plus grande (voir tableau 4).

### • Résistance accrue

Les pièces en VESPEL® ST sont plus solides que leurs homologues SP, tant en termes de résistance à la traction que de tenue à la compression au point de rupture (voir figures 8 et 9)

## Courbes de contrainte-déformation

Les figures 10 et 11 montrent des courbes types de contrainte-déformation en traction pour des pièces usinées en polyimide SP, à 23°C et 260°C; les figures 12 et 13 correspondent à des pièces produites par formage direct. Les courbes diffèrent pour une composition donnée en raison de la plus faible densité des pièces formées directement.

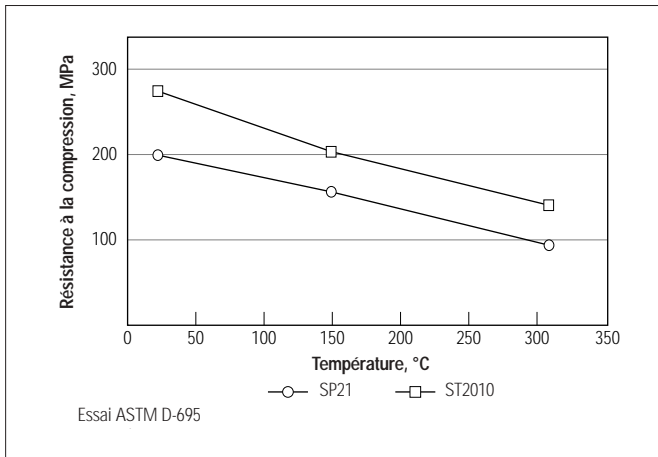


Fig. 8 Influence de la température sur la résistance à la compression au point de rupture du SP21 et du ST2010

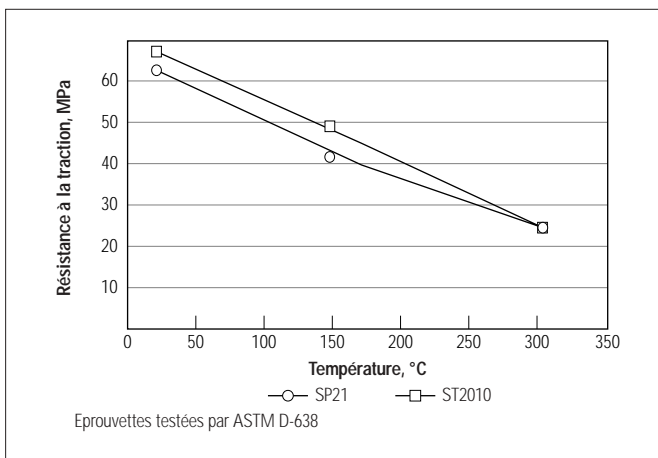


Fig. 9 Influence de la température sur la résistance à la traction au point de rupture du SP21 et du ST2010

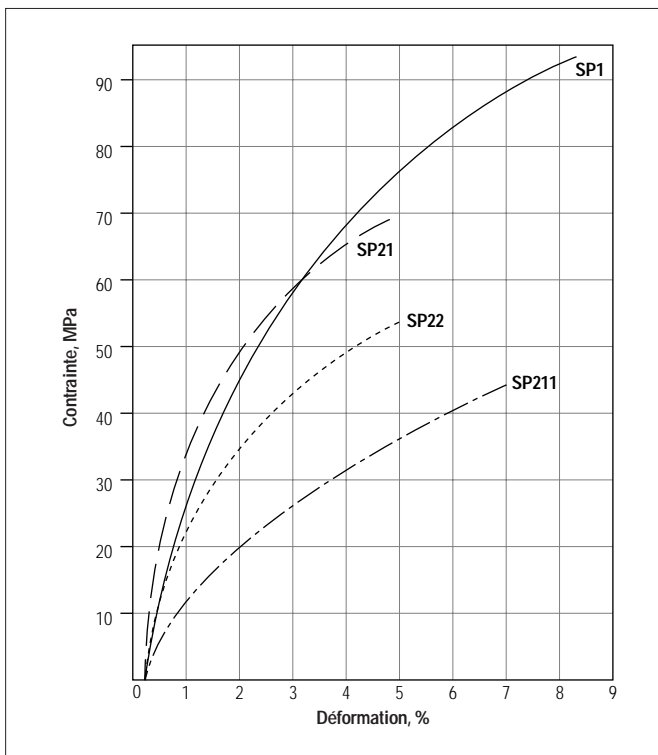


Fig. 10 Semi-produits polyimide SP: contrainte-déformation type en traction à 23°C (ASTM D1708)

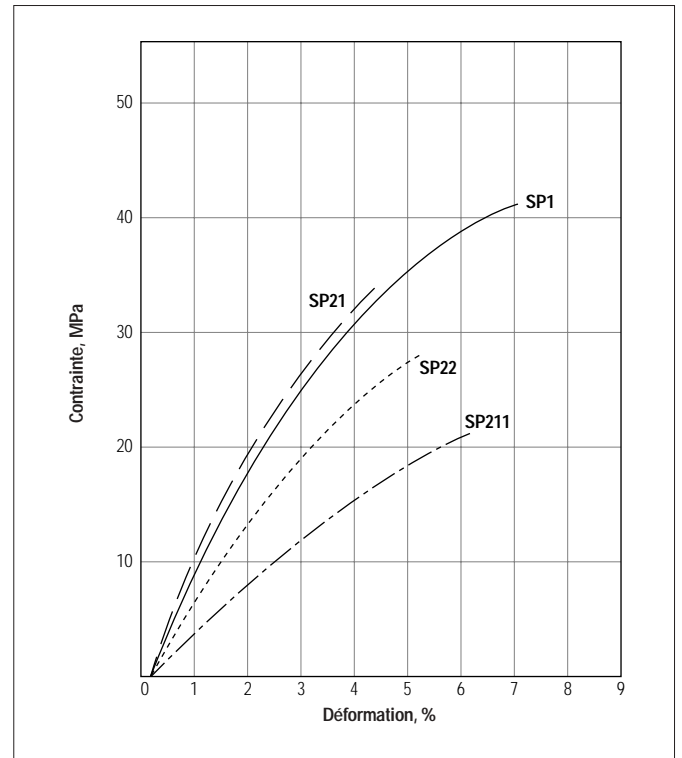


Fig. 11 Semi-produits polyimide SP: contrainte-déformation type en traction à 260°C (ASTM D1708)

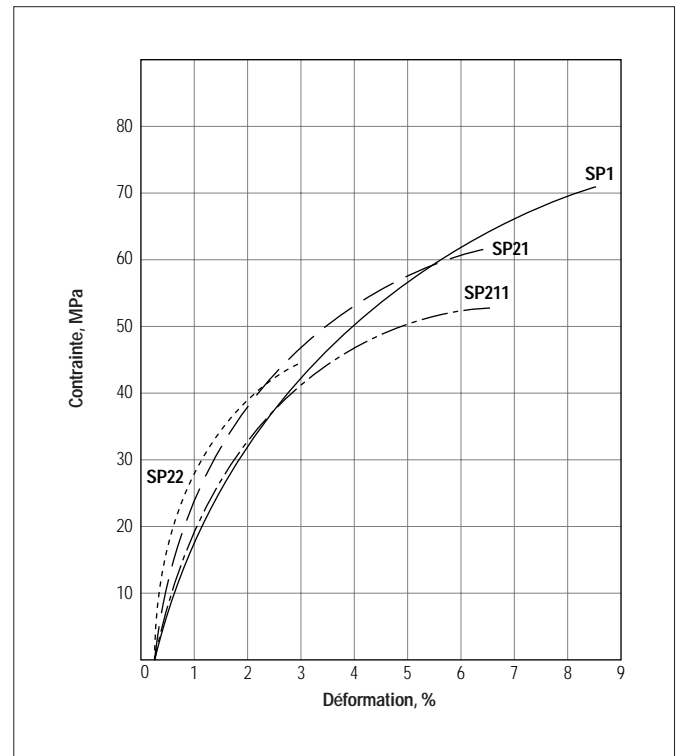


Fig. 12 Polyimide SP formé directement: contrainte-déformation type en traction à 23°C (⊥ à la direction du formage) – ASTM E8

Les figures 14 à 16 apportent des informations sur la contrainte-déformation en compression. Il est possible de comprimer la plupart des compositions de polyimide SP jusqu'à des déformations importantes (>30%) sans rupture. En pratique néanmoins, cela se traduirait par des pièces excessivement déformées. Les courbes montrant de faibles déformations (5% maximum) illustrent les limites pratiques

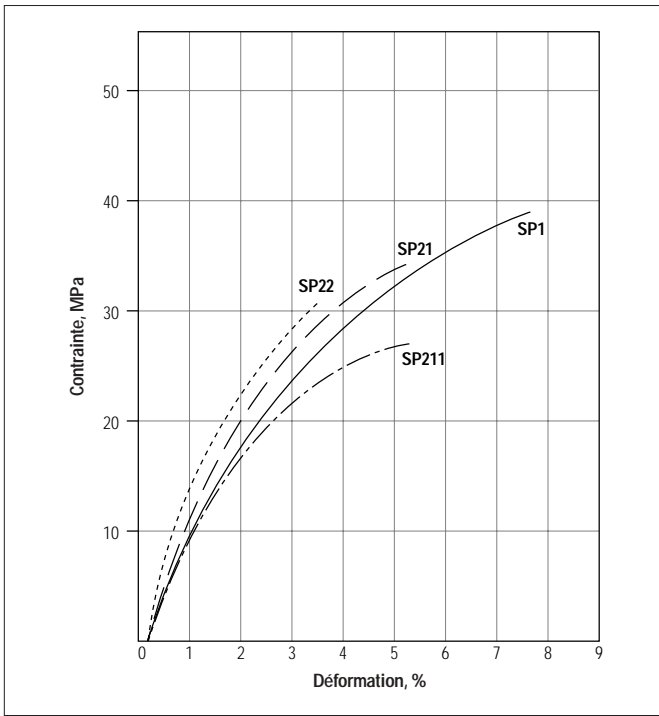


Fig. 13 Polyimide SP formé directement: contrainte-déformation type en traction à 260°C (⊥ à la direction du formage) – ASTM E8

de charge ne dépassant pas de manière significative les limites élastiques des matériaux. Au tableau 1 figurent également les données relatives à la contrainte de compression à 0,1% de déformation rémanente de la pièce.

A l'inverse des plastiques thermodurcissables, les polyimides peuvent être comprimés de plusieurs pour cent avant d'atteindre ce niveau de déformation. Ces matières sont très conformables et, à ce titre, utiles pour réaliser de nombreux types de joints.

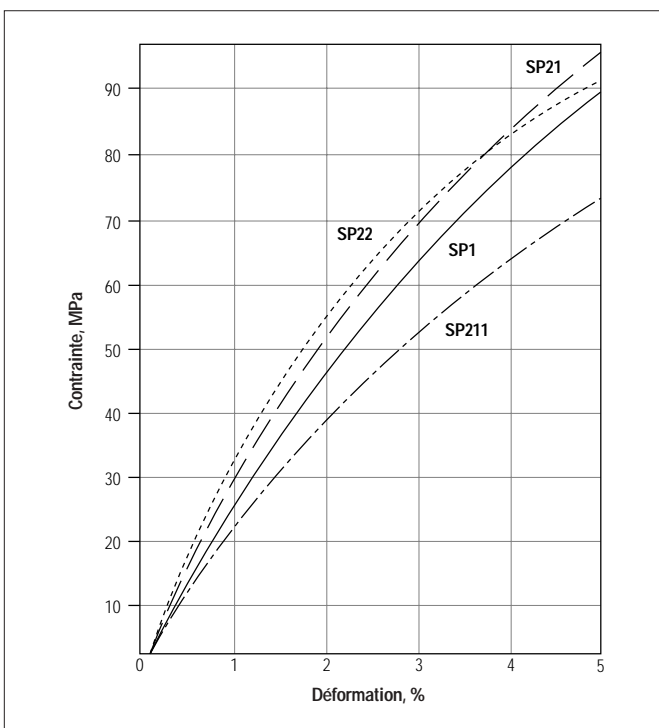


Fig. 14 Semi-produits polyimide SP: contrainte-déformation type en compression à 23°C (ASTM D695)

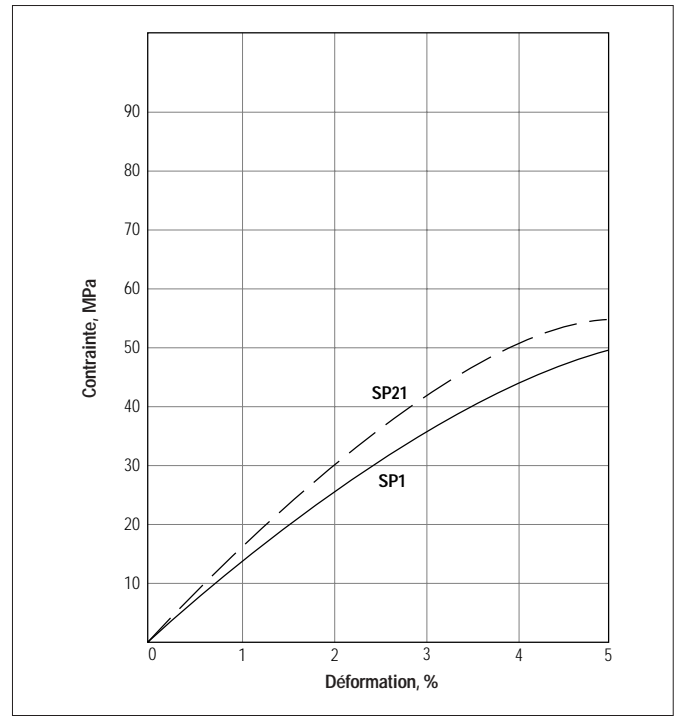


Fig. 15 Semi-produits polyimide SP: contrainte-déformation type en compression à 300°C (ASTM D695)

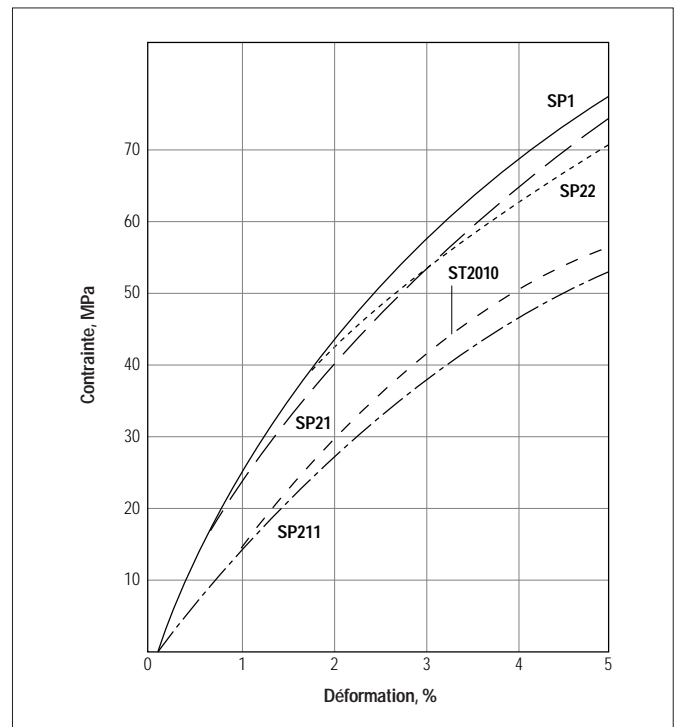


Fig. 16 Polyimides SP et ST formés directement: contrainte-déformation type en compression à 23°C (|| à la direction du formage) – ASTM D695

### Fluage et relaxation des contraintes

Le fluage correspond à la déformation dans le temps subie par un matériau plastique soumis à une contrainte constante.

Le fluage à un moment donné est exprimé par la différence entre la déformation totale à ce moment et la déformation initiale instantanée constatée lors de l'application de la charge.

La relaxation des contraintes correspond à la diminution dans le temps de la contrainte requise pour maintenir une déformation constante.



Les figures 17, 18 et 19 montrent la déformation totale dans le temps subie par des polyimides SP1, SP21 et SP22 soumis à des charges de 10,3 MPa et de 17,2 MPa et à deux températures différentes.

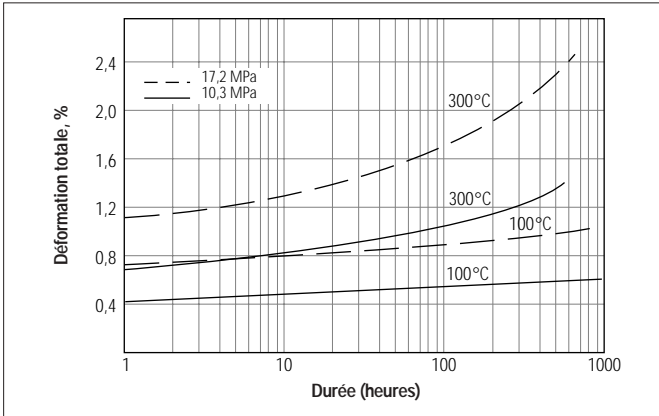


Fig. 17 Semi-produit polyimide SP1: déformation totale dans le temps sous charge

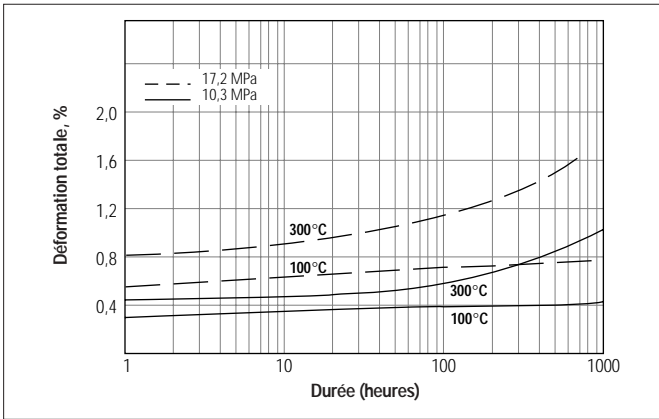


Fig. 18 Semi-produit polyimide SP21: déformation totale dans le temps sous charge

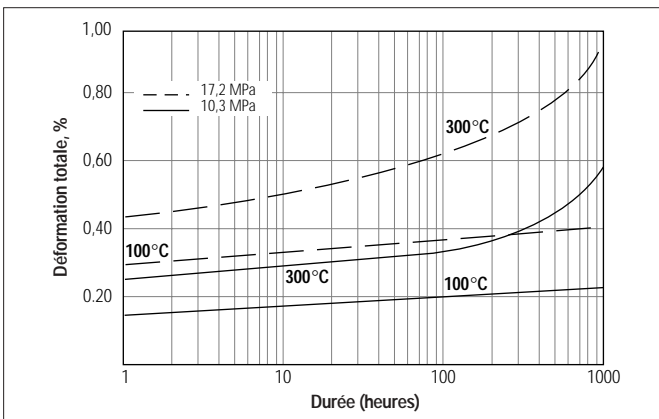


Fig. 19 Semi-produit polyimide SP22: déformation totale dans le temps sous charge

Les polyimides SP ne ramollissent pas et sont dotés d'une bonne résistance thermique. Ils peuvent donc supporter des charges à des températures hors de portée de la plupart des autres matières plastiques et ce, en présentant un fluage extrêmement faible. Cette résistance au fluage est encore améliorée dans les compositions chargées de graphite (SP21 et SP22). Par exemple, comme l'indique la figure 19, le fluage du SP22 à 17,2 MPa et 300°C n'est que de 0,5% après 1000 heures.

Les figures 20 à 22 montrent la modification du module d'élasticité apparent dans le temps correspondant aux figures 17 à 19. En substituant le module apparent en fonction du temps approprié au module d'élasticité dans les équations mécaniques standard, il est possible de prévoir les effets du fluage et de la relaxation des contraintes.

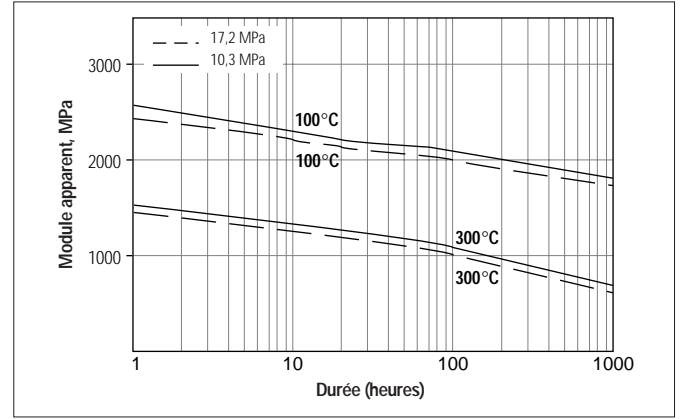


Fig. 20 Semi-produit polyimide SP1: module apparent dans le temps sous charge

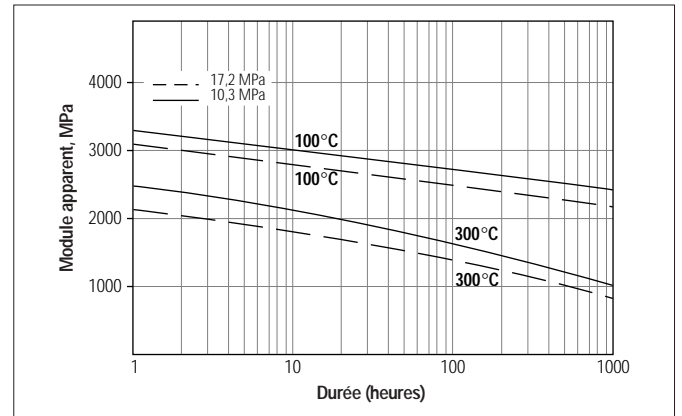


Fig. 21 Semi-produit polyimide SP21: module apparent dans le temps sous charge

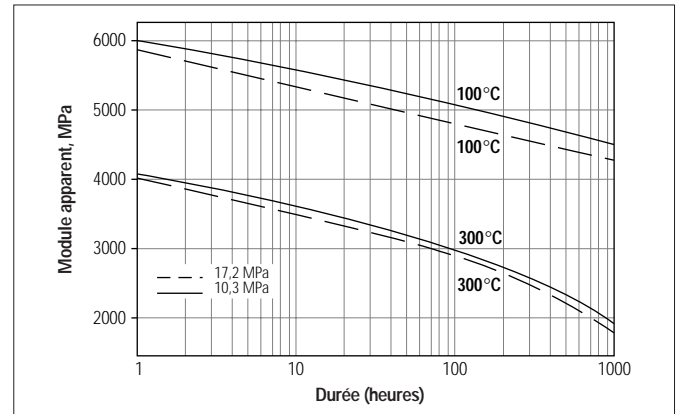


Fig. 22 Semi-produit polyimide SP22: module apparent dans le temps sous charge

## Influence de l'humidité

Les figures 23 à 25 montrent les pourcentages types de variation dimensionnelle due à l'absorption d'humidité par des pièces en polyimide SP usinées et obtenues par formage direct.

Dans un environnement contrôlé, la durée qui sépare l'état sec de la teneur en eau à l'équilibre est très longue (plusieurs milliers d'heures). L'absorption d'humidité s'effectuant par diffusion, les variations sont proportionnellement plus faibles pour les pièces épaisses et plus fortes pour les pièces minces.

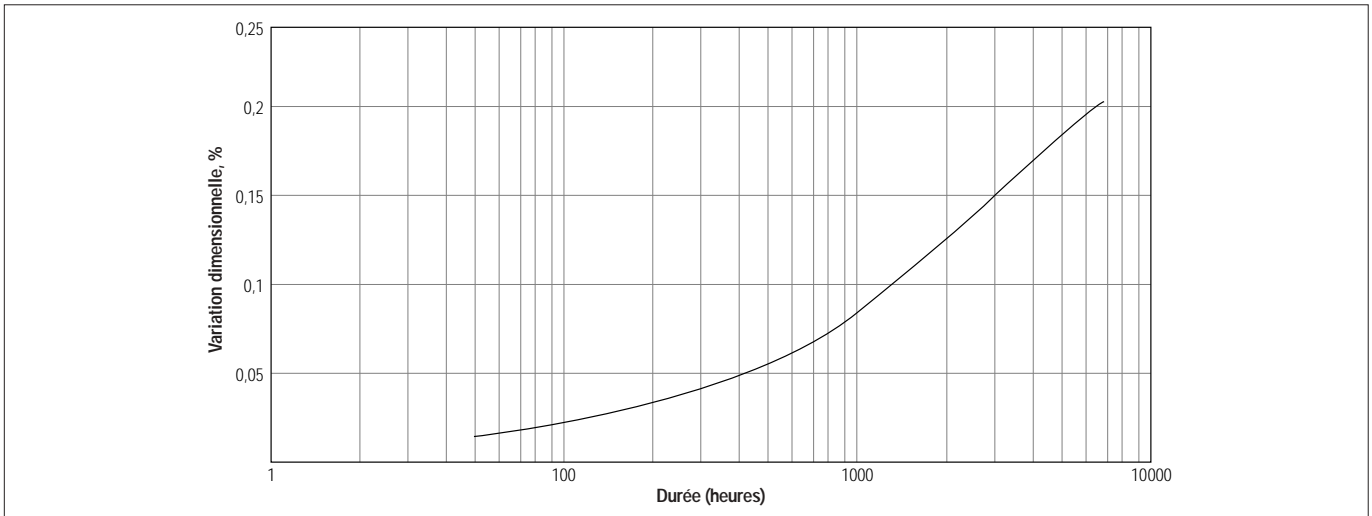


Fig. 23 Semi-produits polyimide SP1 et SP21: variation dimensionnelle type dans le temps à 23°C et 50% de HR pour des plaques de 3,2 mm

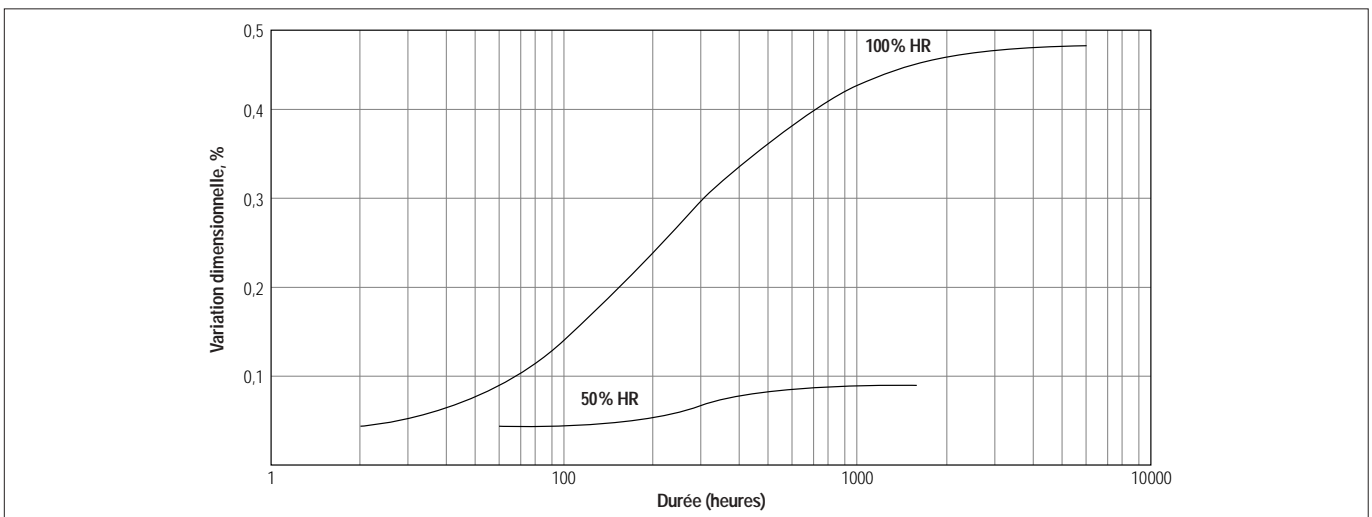


Fig. 24 Polyimide SP1 formé directement: variation dimensionnelle type dans le temps à 23°C, 50 et 100% de HR pour des disques de 25 mm de diamètre et 2,5 mm d'épaisseur

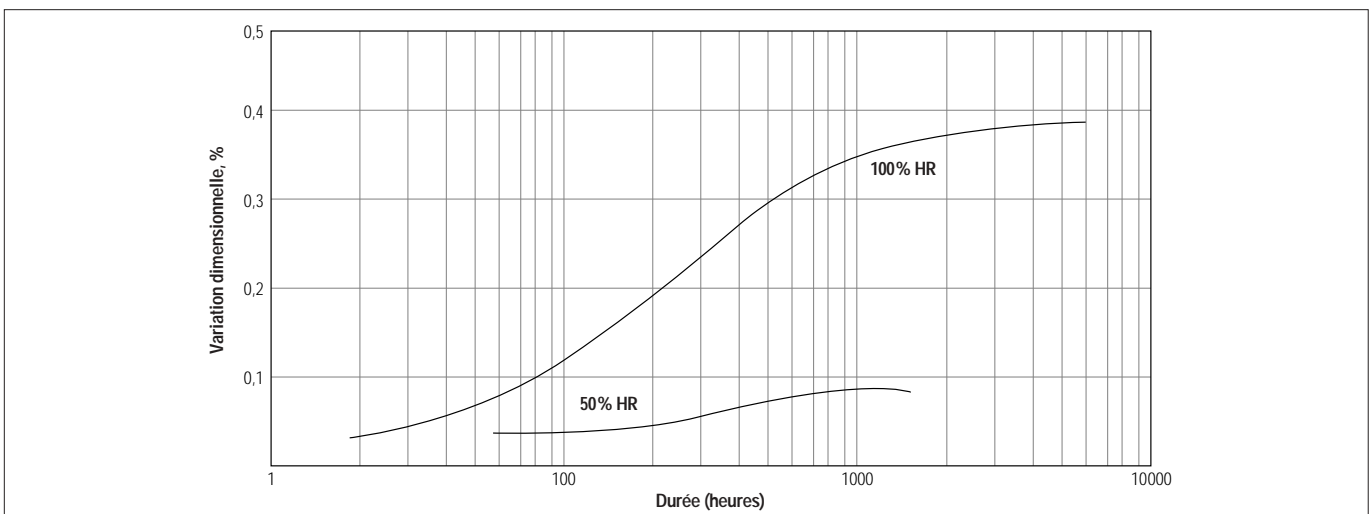


Fig. 25 Polyimide SP21 formé directement: variation dimensionnelle type dans le temps à 23°C, 50 et 100% de HR pour des disques de 25 mm de diamètre et 2,5 mm d'épaisseur

Les figures 26 et 27 montrent l'effet des modifications d'humidité relative (HR) à 23°C sur les dimensions des pièces usinées et formées directement. C'est uniquement après être parvenue à l'équilibre dans un milieu spécifique qu'une pièce atteint sa variation dimensionnelle maximale à un niveau d'humidité relative donné. Pour une pièce parfaitement sèche atteignant l'équilibre à 100% de HR et 23°C, la variation maximale résultante est d'environ 0,5% ou 0,005 mm/mm.

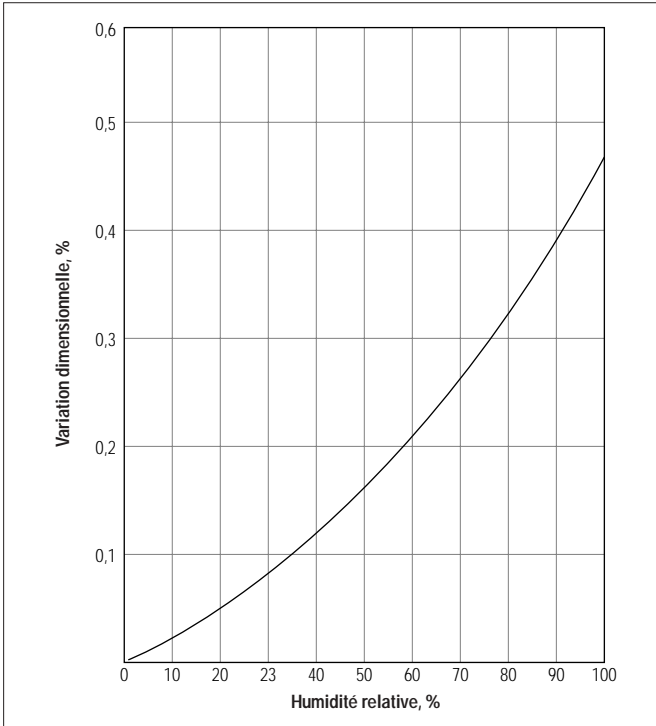


Fig. 26 Semi-produits polyimide SP1 et SP21: variation dimensionnelle type à l'équilibre à 23°C en fonction de l'humidité relative

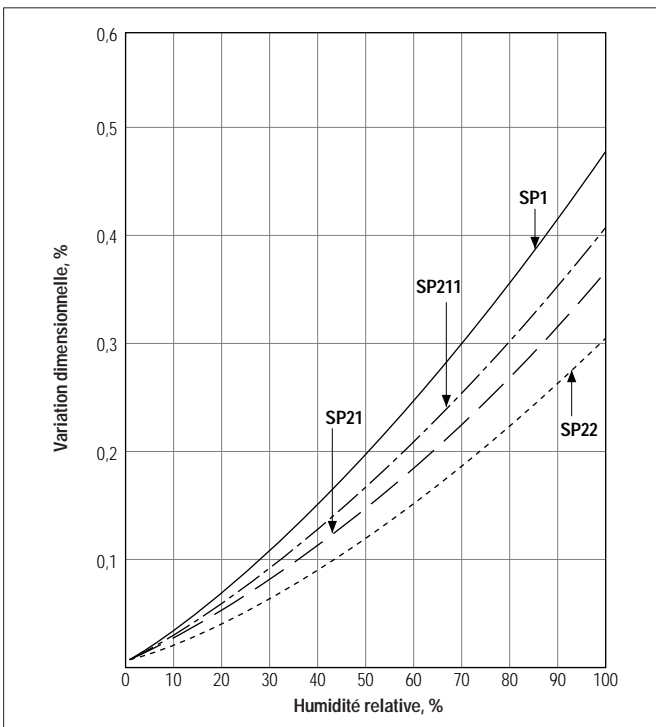


Fig. 27 Polyimide SP formé directement: variation dimensionnelle type à l'équilibre à 23°C en fonction de l'humidité relative

## Dilatation thermique

Les figures 28 et 29 montrent la variation dimensionnelle linéaire sous l'effet de la température des pièces usinées et formées directement. Chaque schéma comporte le coefficient moyen de dilatation thermique sur une plage de températures de 23 à 300°C. Ce coefficient peut différer légèrement sur une autre plage de températures. Il peut être calculé à partir des courbes en divisant le pourcentage de variation dimensionnelle par la plage voulue multipliée par 100 fois l'écart de température en degrés ( $\Delta T$ ).

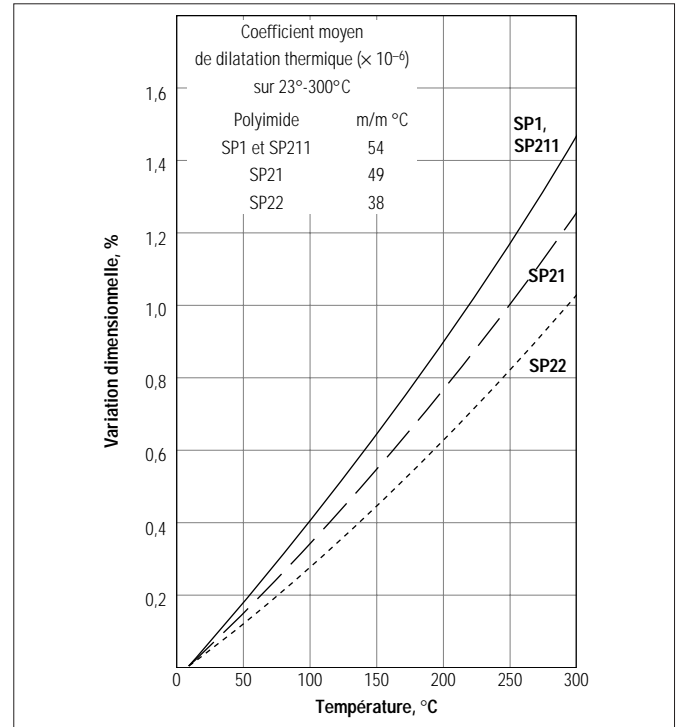


Fig. 28 Semi-produits polyimide SP: dilatation thermique linéaire (ASTM D696)

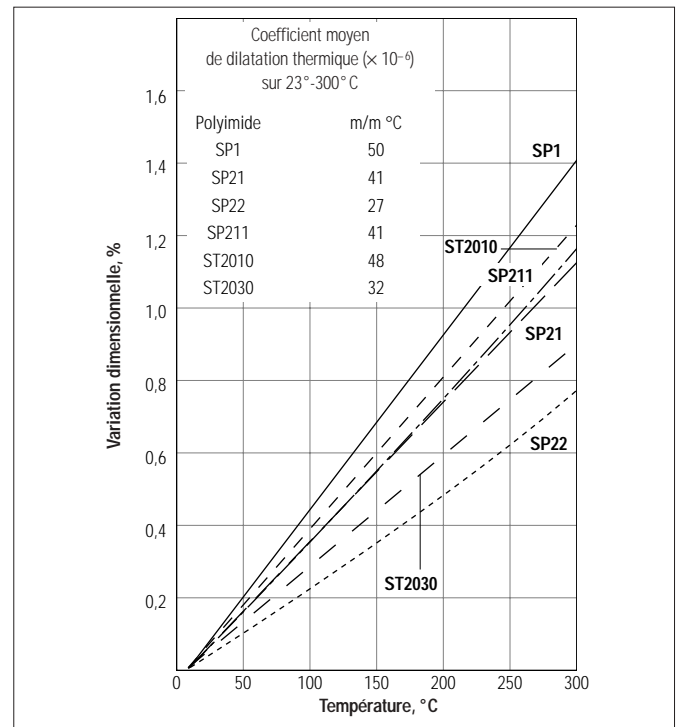


Fig. 29 Polyimides SP et ST formés directement: dilatation thermique linéaire ( $\perp$  à la direction du formage) – ASTM D696

Dans toutes les compositions, la dilatation thermique est plus faible pour les pièces formées directement que pour les pièces usinées, résultat de «l'effet directionnel» mentionné plus haut.

Par ailleurs, les charges de graphite réduisent la dilatation thermique: celle des polyimides SP21 et SP22 est donc inférieure à celle du SP1 non chargé. Le coefficient de dilatation thermique du SP22 est proche de celui de l'aluminium et celui du SP262 proche de celui de l'acier.

## Résistance à la fatigue et au choc

La défaillance des matériaux soumis à des contraintes inférieures à leur résistance à la rupture en traction lors de l'application de contraintes répétées de manière cyclique est connue sous le nom de rupture par fatigue. La figure 30 montre, pour les polyimides SP1 et SP21, le nombre de cycles supportés (de  $10^5$  à  $10^7$ ) avant rupture due à la contrainte exercée à des températures s'élevant jusqu'à  $260^\circ\text{C}$ . La contrainte a été appliquée alternativement en traction et en compression à 1800 cycles par minute. A cette fréquence, la surchauffe de l'éprouvette a peu ou pas d'incidence et ne risque pas d'entraîner de rupture prématurée.

Bien que les données obtenues au cours des essais soient des indications importantes pour la conception, il ne faut pas les utiliser directement sans tenir compte du milieu et de la concentration des contraintes. En effet, les éprouvettes présentent en général une surface lisse, or la présence d'entailles, d'éraflures, de trous ou d'angles vifs est susceptible de concentrer l'effet des contraintes exercées. En conséquence, les essais de fatigue ne se substituent en aucun cas aux essais dans les conditions réelles ou simulées d'utilisation.

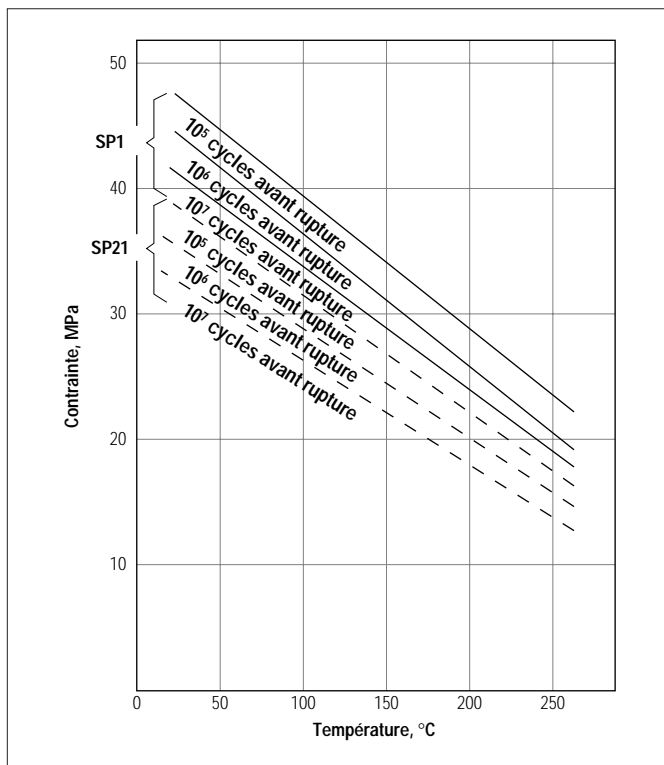


Fig. 30 Semi-produits polyimide SP: résistance type à la fatigue à la traction et à la compression répétées en fonction de la température (1800 cycles par minute, soit 30 Hz)

La résistance au choc est difficile à prévoir en raison de l'incidence de la géométrie de la pièce, de la concentration des contraintes et du pourcentage de charge. Pour augmenter leur résistance au choc, il convient de concevoir les pièces de manière à obtenir une surface maximale d'application de la charge. Donner à la pièce le maximum de souplesse permet également d'augmenter la distance d'absorption de l'énergie déployée par le choc.

A l'instar de la plupart des plastiques, les polyimides SP et ST présentent une sensibilité à l'effet d'entaille comme le montrent les valeurs indiquées aux tableaux 1 et 4 pour la résistance au choc Izod avec entaille. Il convient donc d'éviter, lors de la conception, les angles vifs ou tout autre source de concentration des contraintes dans la pièce.

## Propriétés électriques

En raison de leurs très bonnes propriétés électriques, alliées à une grande résistance mécanique et une excellente résistance thermique et aux radiations, les pièces VESPEL® conviennent parfaitement aux applications électriques en milieux difficiles. Plus important encore, elles conservent leurs propriétés électriques aux températures élevées.

La constante diélectrique (figure 31) décroît graduellement de 3,5 à température ambiante à 3 à  $260^\circ\text{C}$ . A une température donnée, elle reste pratiquement indépendante de la

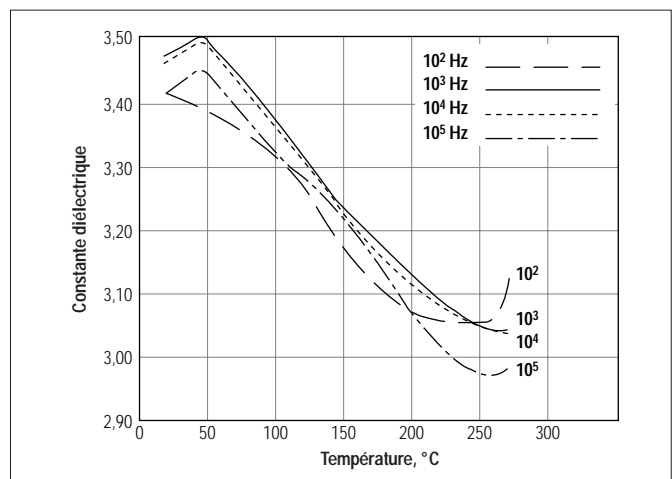


Fig. 31 Polyimide SP1: influence de la température sur la constante diélectrique (ASTM D150)

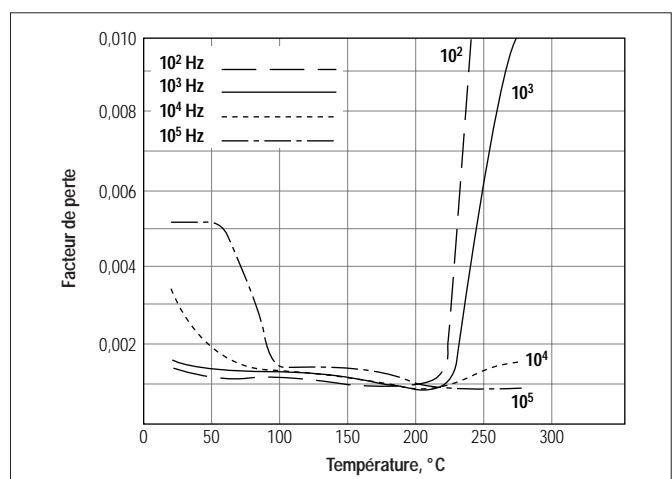


Fig. 32 Polyimide SP1: influence de la température sur le facteur de pertes (ASTM D150)

fréquence entre  $10^2$  et  $10^5$  Hz. La température et la fréquence influent sur le facteur de pertes (figure 32). Jusqu'à  $100^\circ\text{C}$  environ, ce dernier croît avec la fréquence. De  $100$  à  $200^\circ\text{C}$ , il est pratiquement indépendant de la fréquence, tandis qu'au-delà de  $200^\circ\text{C}$ , il décroît lorsque la fréquence augmente. La constante diélectrique et le facteur de pertes augmentent avec la teneur en humidité. Par exemple, à  $10^3$  Hz et à température ambiante, la constante diélectrique d'une éprouvette sèche (en polyimide SP1) est de 3,1 et son facteur de pertes de 0,001.

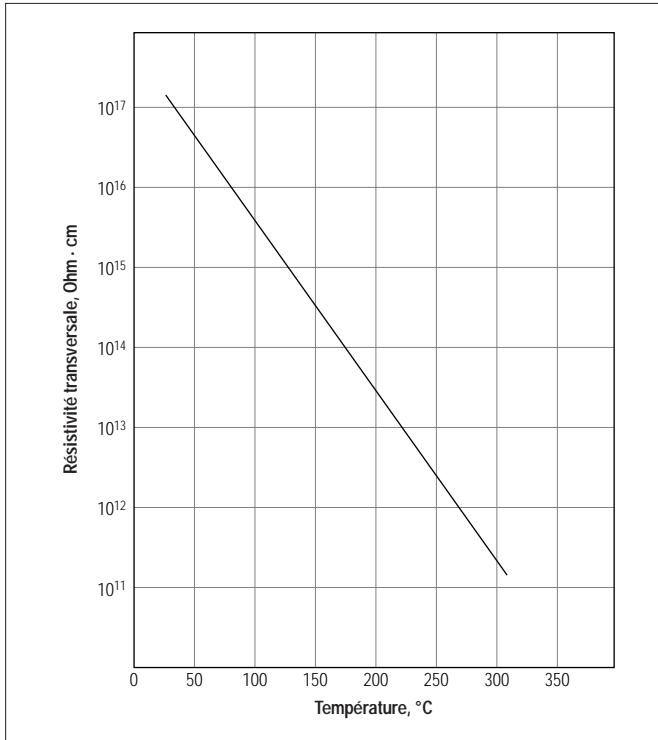


Fig. 33 Semi-produit polyimide SP1: influence de la température sur la résistivité transversale (ASTM D257)

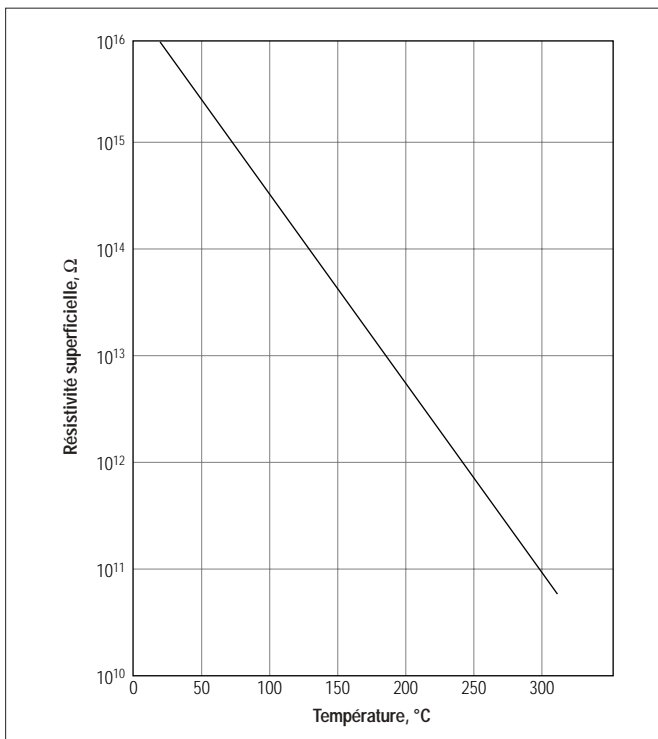


Fig. 34 Semi-produit polyimide SP1: influence de la température sur la résistivité superficielle (ASTM D257)

Une teneur en humidité de 2,4% (obtenue après 300 heures d'immersion dans l'eau à température ambiante), porte ces valeurs respectivement à 4 et 0,002. Le séchage rétablit les valeurs d'origine.

La teneur en humidité exerce relativement peu d'effet sur la résistivité transversale et la résistivité superficielle.

La résistivité transversale des éprouvettes moulées à partir de polyimide non chargé est de  $10^{17}$  ohms-centimètres à

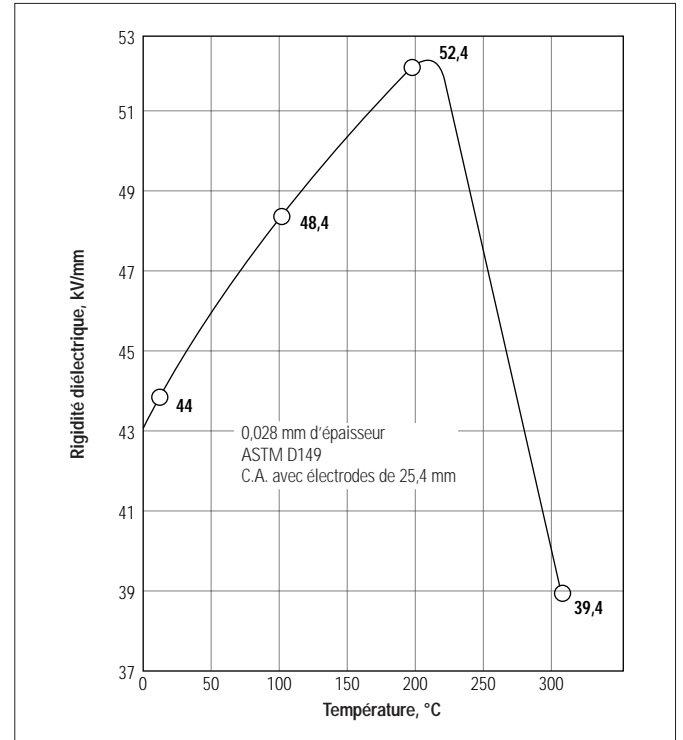


Fig. 35 Semi-produit polyimide SP1: influence de la température sur la rigidité diélectrique dans l'air (ASTM D149)

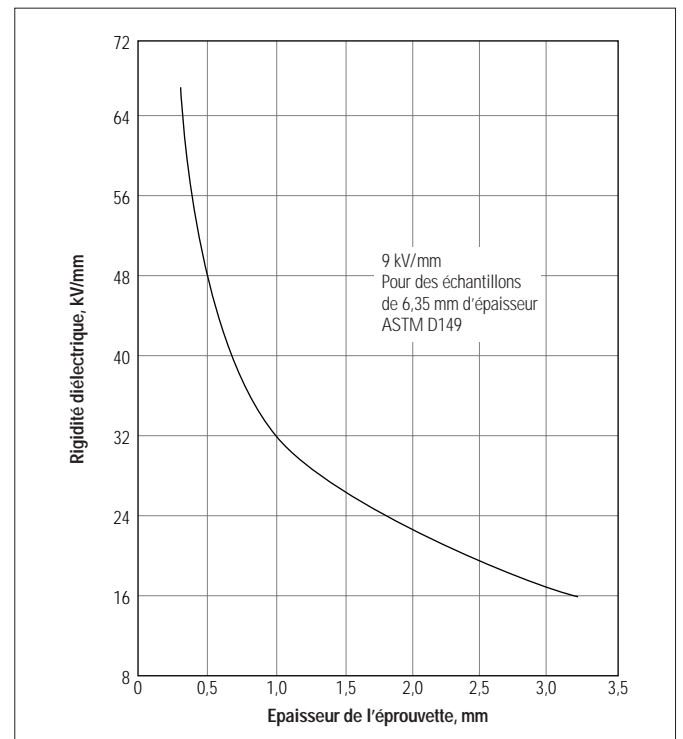


Fig. 36 Semi-produit polyimide SP1: influence de l'épaisseur sur la rigidité diélectrique dans l'huile A-8 (ASTM 149)

température ambiante (figure 33). Cette valeur décroît de manière linéaire jusqu'à  $10^{11}$  ohms-centimètres à 300°C.

La résistivité superficielle (figure 34) est de  $10^{16}$  ohms à température ambiante et diminue linéairement jusqu'à  $5 \times 10^{10}$  à 300°C.

La résistance aux décharges électriques (effets corona) des pièces VESPEL® est supérieure à celle des résines fluorocarbonées et des polyéthylènes. Ainsi, à 7,8 kV/mm (60 Hz et à température ambiante), les pièces résistent aux décharges pendant 2200 heures.

## Effet des produits chimiques

Les pièces en VESPEL® SP ont de bonnes performances dans des milieux chimiques divers. Les données relatives à la résistance à la traction indiquées au tableau 5 ont été obtenues lors d'essais définis selon la méthode ASTM D 543-67 «Resistance of plastics to chemical reagents» (résistance des plastiques aux agents chimiques).

### Résistance accrue aux produits chimiques

Les pièces en VESPEL® ST se caractérisent également par une résistance accrue aux produits chimiques (en particulier aux acides et aux bases) et une meilleure stabilité hydrolytique, tout en conservant l'exceptionnelle résistance aux solvants des pièces SP.

#### A. Solvants

1. Les solvants organiques ont en général peu d'impact sur la stabilité dimensionnelle et la stabilité mécanique des pièces polyimides.
2. Les solvants chlorés et fluorés (perchloréthylène, trichloréthylène, Axarel®) sont recommandés pour le nettoyage de la surface des pièces VESPEL®.
3. Les solvants à base d'hydrocarbures (toluène, kérosène) n'ont pratiquement aucun effet sur le polyimide.
4. Aux températures élevées, certains solvants contenant des groupes fonctionnels (m-crésol et nitrobenzène, par exemple) peuvent provoquer le gonflement du polyimide SP, sans pour autant réduire de manière significative sa résistance mécanique.
5. Résultats des essais effectués sur quelques solvants:

Perchloréthylène	1900 heures à 100°C. Conservation de la résistance à la traction initiale: 100%. Perte de poids: 0,4%.
Toluène	1900 heures à 100°C. Conservation de la résistance à la traction initiale: 85%. Perte de poids: 0,1%.
Ethanol	1900 heures à 100°C. Conservation de la résistance à la traction initiale: 100%. Gain de poids: 0,2%.
Diéthylcétone	1900 heures à 100°C. Conservation de la résistance à la traction initiale: 75%. Gain de poids: 0,3%.

Carburéacteur JP-4	1900 heures à 100°C. Conservation de la résistance à la traction initiale: 80%. Perte de poids: 0,8%.
O-dichlorobenzène	1000 heures à 180°C. Conservation de la résistance à la traction initiale: 100%. Gain de poids: 2,4%.
M-crésol	1000 heures à 200°C. Conservation de la résistance à la traction initiale: 75%. Augmentation des dimensions: 3%.
Nitrobenzène	1000 heures à 215°C. Conservation de la résistance à la traction initiale: 85%. Gain de poids: 9%. Augmentation des dimensions: 2,5%.

#### B. Huiles

1. **Huiles pour réacteur:** à 260°C dans une huile MIL L7808 et une huile pour réacteur de type 2, le SP1 a conservé, dans les deux cas, 60% de sa résistance à la traction initiale et 30% de son allongement initial après 600 heures; dans les mêmes conditions, le SP21 a conservé respectivement 90% et 70% des mêmes propriétés. Après 1000 heures, les résultats étaient respectivement de 30% et 10% pour le SP1 et de 60% et 30% pour le SP21. Les deux compositions ont enregistré une augmentation de poids d'environ 0,2% dans l'huile MIL L 7808 et de 0,5% dans l'huile de type 2 en 1000 heures. Dans la direction parallèle, les dimensions ont augmenté jusqu'à 0,3%; elles ont diminué jusqu'à 0,1% dans la direction perpendiculaire.
2. **Huile au silicone:** à 260°C, le SP1 a conservé 70% de sa résistance à la traction initiale et 35% de son allongement initial après 1000 heures. Dans les mêmes conditions, le SP21 a conservé respectivement 85% et 50% des mêmes propriétés. Les deux compositions ont enregistré une augmentation de poids de 0,3%. Dans la direction parallèle, les dimensions ont augmenté de 0,2%; elles ont diminué de moins de 0,1% dans la direction perpendiculaire.
3. **Huile minérale raffinée:** à 200°C, le SP1 a conservé 70% de sa résistance à la traction initiale et 40% de son allongement initial après 1000 heures. Dans les mêmes conditions, le SP21 a conservé respectivement 90% et 65% des mêmes propriétés. Les deux compositions ont enregistré une augmentation de poids d'environ 0,3%. Dans la direction parallèle, les dimensions ont augmenté d'environ 0,1%; elles ont diminué de moins de 0,1% dans la direction perpendiculaire.
4. **Fluide hydraulique à l'ester polyphosphate:** aucune modification des propriétés n'a été constatée après 1000 heures à 120°C.
5. **Phosphate de tricrésyle (adjuvant pour huile):** après 1000 heures à 260°C, le SP1 a enregistré un gain de poids de 1,5% tout en conservant 80% de sa résistance à la traction. Les dimensions ont augmenté d'environ 0,25%.

### C. Eau

1. A 100°C, la résistance à la traction et l'allongement du SP sont réduits jusqu'à respectivement 45% et 30% des valeurs initiales et ce, après 500 heures environ, point auquel les valeurs se stabilisent.
2. Le séchage permet dans la plupart des cas de récupérer la résistance à la traction initiale, preuve que cette réduction des propriétés n'est pas due à des modifications d'ordre chimique.
3. Les pièces VESPEL® conviennent aux applications qui impliquent le contact avec de l'eau jusqu'à 100°C, sous réserve que les contraintes soient suffisamment modérées pour tenir compte de la réduction des propriétés mécaniques.
4. A l'instar de tous les polyimides, le SP est sujet à l'hydrolyse. Il peut subir une fissuration grave dans l'eau ou à la vapeur au-delà de 100°C.

### D. Acides

1. Les acides minéraux concentrés provoquent une fragilisation sérieuse des pièces en polyimide et ce, dans un laps de temps relativement court.
2. L'acide chlorhydrique concentré (38%) a entraîné une réduction de 30% de la résistance à la traction et de 40% de l'allongement après 120 heures à température ambiante.
3. L'acide nitrique concentré (70%) a entraîné une réduction de 60% de la résistance à la traction et de 75% de l'allongement après 120 heures à température ambiante. Cette importante réduction des propriétés est probablement due, en partie, à l'action oxydante de l'acide.
4. L'acide chlorhydrique à 5% a réduit la résistance à la traction du SP de 80% après 1900 heures à 100°C.
5. L'acide acétique à 15% a réduit la résistance à la traction du SP de 80% après 1900 heures à 100°C.
6. En général, l'impact sur le SP des solutions acides diluées et des solutions aqueuses de sels minéraux ayant un pH acide est quasi identique à celui de l'eau.

### E. Bases

1. D'une manière générale, les résines polyimides sont attaqués par les alcalis. Les bases en solution aqueuse soumettent les pièces VESPEL® à une attaque chimique provoquant une détérioration rapide de leurs propriétés.
2. En 120 heures à température ambiante, une solution d'hydroxyde de sodium à 5% a réduit la résistance à la traction du SP de 45%. La surface du SP, normalement de teinte brune, a noirci et le poids a augmenté de 27%.
3. Il faut éviter le contact avec toutes les solutions basiques dont le pH est supérieur ou égal à 10, y compris les solutions salines.
4. Il est déconseillé d'utiliser des agents de nettoyage caustiques.
5. Le SP subit rapidement une attaque chimique de la part des bases anhydres telles que l'ammoniac anhydre (à l'état liquide ou de vapeur) et les hydrazines.
6. Exposé à l'action de l'ammoniac anhydre liquéfié, le SP s'est sérieusement fissuré en un laps de temps relativement court.

7. Les vapeurs d'ammoniac provoquent une attaque chimique qui se traduit en particulier par un cloquage.
8. Une exposition brève à l'action de la diméthylhydrazine dissymétrique, tant à l'état liquide que gazeux, a réduit la résistance à la traction de 55% et l'allongement de 35%.
9. Les amines primaires et secondaires attaquent le SP.
10. Dans les applications des pièces VESPEL®, il faut éviter tous les produits chimiques de l'ordre des bases.

Tableau 5 Impact des produits chimiques

Produit	°C	Durée, (h)	% de résistance à la traction conservée par le SP1
<b>Solvants organiques</b>			
M-Crésol	200	1000	75 <sup>1</sup>
o-Dichlorobenzène	180	1000	100
Diethyl kétone	100	1900	100
Ethanol	100	1900	100
Nitrobenzène	215	1000	85 <sup>1</sup>
Perchloroéthylène	100	1900	100
Toluène	100	1900	85
<b>Huiles industrielles</b>			
Fluide hydraulique à l'ester polyphosphate «Skydrol»	120	1000	100
Carburacteur JP-4	100	1900	80
Huiles pour réacteur (MIL L 7808G)	260 260	600 1000	60 (90) <sup>2</sup> 30 (60) <sup>2</sup>
Huile minérale	200	1000	70 (90) <sup>2</sup>
Huile au silicone	260	1000	80
Phosphate de tricrésyle (adjuvant pour huile)	260	1000	80
<b>Acides</b>			
Acétique à 15%	100	1900	20
Chlorhydrique à 38%	23	120	70
Chlorhydrique à 5%	100	1900	15
Nitrique à 70%	23	120	40
<b>Bases</b>			
Hydroxyde de sodium à 5%	23	120	55
<b>Oxydants</b>			
Tétraoxyde d'azote	23	120	60

1 Gonflement.

2 Polyimide SP21 (chargé de 15% de graphite)..

## F. Oxydants

1. Les agents chimiques qui sont de puissants oxydants peuvent oxyder les pièces VESPEL® même dans des conditions d'exposition modérées (voir l'impact de l'acide nitrique à la rubrique Acides).
2. En 120 heures à température ambiante, le tétraoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) a provoqué une réduction de la résistance à la traction et de l'allongement de 40% et une augmentation de poids de 3%.

## G. Compatibilité avec l'oxygène

Sa compatibilité avec l'oxygène liquide et gazeux constitue une caractéristique importante du SP21.

Le SP21 de DuPont a été soumis aux essais par la N.A.S.A. (National Aeronautics and Space Administration). Il a été déclaré conforme à la norme MSFC-SPEC-106B, «Testing Compatibility of Materials for Liquid Oxygen System» (Essais de compatibilité des matériaux soumis à l'action de l'oxygène liquide). A l'heure actuelle, cette homologation est accordée sur sélection de lots de produits.

En outre, le SP-1 a été testé au «Naval Air Engineering Center, Département» de la Navy. Il a été déclaré conforme à la norme MIL-V-5027C, «Non-Metallic Materials Compatible with Oxygen» (matériaux non métalliques compatibles avec l'oxygène).

Il y a tout lieu de penser que d'autres compositions chargées de résines SP sont conformes aux normes ci-dessus, mais elles n'ont pas encore fait l'objet des essais correspondants. La résine non chargée (SP1) ne satisfait pas aux exigences de ces normes.

## Autres propriétés

### Tenue à l'action des agents atmosphériques

Soumises à une exposition prolongée à l'extérieur, les pièces en polyimide SP subissent une certaine réduction de leurs propriétés de résistance à la traction et d'allongement. Ce n'est qu'après des essais appropriés que l'on peut envisager l'emploi des pièces VESPEL® dans de telles conditions. En revanche, elles résistent parfaitement à l'attaque fongique et des éprouvettes testées se sont montrées conformes aux conditions imposées par la norme MIL-E 5272 et à la spécification fédérale CCC-T-191 b, Méthodes 5762 et 5751, en ce qui concerne la résistance aux moisissures et à l'action des agents de décomposition putride.

### Toxicité

Au cours d'essais de laboratoire effectués sur des animaux impliquant l'inhalation, l'ingestion et le contact cutané, on n'a constaté aucun effet toxique imputable au polyimide SP. Aucune demande relative à l'homologation des pièces VESPEL® pour l'emploi au contact de denrées alimentaires n'a été adressée à la FDA (Food and Drug Administration).

Comparé à la plupart des matériaux organiques, le polyimide SP est un polymère hautement thermostable, mais il peut dégager de l'oxyde de carbone (CO) comme produit de combustion. Pour faire en sorte que la concentration en CO reste inférieure à la limite de sécurité admissible, il convient d'assurer une ventilation suffisante dans les cas où les pièces VESPEL® sont exposées à des températures élevées dans des lieux confinés.

## Dégazage

Une fois les pièces VESPEL® parfaitement sèches, leur perte de poids sous vide à des températures élevées est faible. Lors des essais réalisés par la N.A.S.A. au Lewis Research Center, les éprouvettes, préalablement séchées à 93°C, ont montré un taux de perte de poids inférieur à 10<sup>-10</sup> g/cm<sup>2</sup>/s à des températures inférieures à 260°C. A 350°C, le taux était de 10<sup>-7</sup> g/cm<sup>2</sup>/s.

## Classe d'inflammabilité (UL 94)

Le Vespel est classé UL 94-5V et 94 V-0. Sont concernés les SP1, SP21, SP22 et SP211 pour une épaisseur minimale comprise entre 1,6 et 1,7 mm. Les produits ST n'ont pas encore été évalués à ce jour.

## Stockage

Pour des performances optimales à l'utilisation, il convient de stocker les pièces et semi-produits VESPEL® à l'intérieur, dans des conditions ambiantes normales. La température ne doit pas excéder 40°C. A éviter: l'exposition au rayonnement solaire, aux ultraviolets ou à toute autre forme de radiations, ainsi que le contact direct avec de l'eau et des produits chimiques.

## Indice limite d'oxygène

ASTM D2863.

### Définition:

L'indice limite d'oxygène correspond à la concentration minimum d'oxygène d'un mélange d'oxygène et d'azote qui permet de maintenir enflammé un échantillon plongé dans cette atmosphère artificielle.

VESPEL® SP1	53% de O <sub>2</sub>
VESPEL® SP21	49% de O <sub>2</sub>

## Inflammation au fil chaud (UL 746 A)

Les VESPEL® SP1, SP21, SP22 et SP211 sont répertoriés à la classe 0 pour une épaisseur de 1,6 et 3,2 mm. Les produits ST n'ont pas encore été évalués à ce jour.



## Formage direct

Pour la production de grandes séries de pièces de précision VESPEL<sup>®</sup>, il est souvent plus économique d'opter pour le procédé de formage direct de DuPont. Ce procédé met en oeuvre des techniques de la métallurgie des poudres pour produire des pièces finies ou des ébauches quasiment identiques à celles produites par l'usinage de semi-produits, tout en réduisant voire éliminant complètement les déchets. Dans la plupart des cas, le processus de formage est si précis que les pièces ne requièrent aucun usinage de finition.

Il n'existe aucune règle quant à la quantité minimale de la série commandée puisque tous les travaux sont pris en considération de manière distincte, mais on considère habituellement que l'on peut réaliser des économies à partir de 1000 pièces.

DuPont fait l'acquisition des matrices de précision utilisées pour le formage, qui restent sa propriété. En revanche, le client prend à sa charge les travaux d'études, de mise au point et d'essai de l'outillage.

Le formage direct a des limites : toutes les formes et toutes les dimensions ne sont pas réalisables, même si certaines pièces sont aujourd'hui fabriquées de cette manière alors que c'était autrefois impensable.

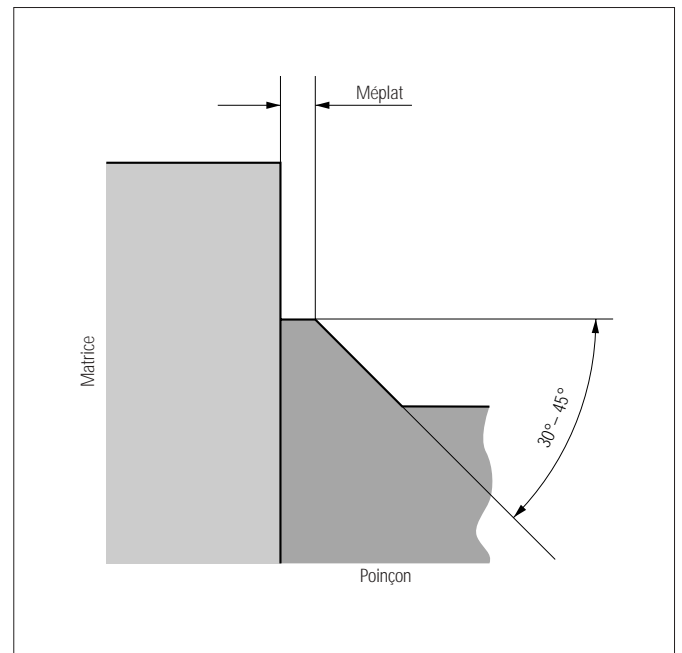
La fabrication des pièces de section constante (douilles et disques, par exemple), avec ou sans trou, ou tout profil pouvant être formé avec des poinçons supérieur et inférieur identiques, ne présente pas de difficulté. Des noyaux servent à former les trous. Tout profil radial peut donc être réalisé à condition de pouvoir usiner noyau et matrice. Les méplats, rainures de clavetage et dents d'engrenage sont aussi faciles à réaliser que les trous ronds. Dans certains cas (les capots, par exemple), il est possible de ménager des trous borgnes. Un petit épaulement, ou indentation, peut être formé dans une pièce plate sous réserve de respecter les restrictions décrites à la rubrique «Remarques relatives à la conception».

Les pièces présentant des zones de sections variées nécessitent plusieurs courses de compression car la poudre ne s'écoule pas aisément d'une section à l'autre. Il est possible de produire des pièces à deux sections (des douilles épaulées, par exemple). Des pièces de ce type requièrent deux courses de compression inférieures et une course supérieure. En règle générale, l'usinage de finition s'impose au-delà de deux sections.

La géométrie de la pièce doit permettre l'éjection hors de la matrice. Ainsi, il est impossible de réaliser des contredépouilles, des trous perpendiculaires à la direction de la compression, des parties coniques inversées, des angles rentrants et des filets. Néanmoins, ces caractéristiques peuvent être usinées ultérieurement sans perdre les avantages économiques du formage direct.

L'épaisseur des parois est fonction de la hauteur de la pièce. Plus la pièce est haute, plus la paroi doit être épaisse, car il faut que la poudre s'écoule dans l'empreinte de la matrice et la remplisse de manière uniforme.

L'angle des chanfreins, si besoin est, ne doit pas excéder 30° par rapport à l'horizontale, c'est-à-dire perpendiculairement à la direction de la compression. On produit des chanfreins à 45°, mais au détriment de la durée de vie de l'outillage. Afin



d'éviter la présence d'un bord aigu sur les poinçons, les chanfreins doivent être dotés d'un méplat de 0 à 0,3 mm.

Les pièces formées directement peuvent atteindre approximativement 58 mm d'épaisseur.

Les propriétés physiques des pièces VESPEL<sup>®</sup> réalisées par formage direct diffèrent légèrement de celles des pièces usinées à partir de semi-produits.

Pour la plupart des applications, l'ingénieur d'études n'a pas à se soucier de ces différences. Cependant, dans le cas d'applications critiques, nous préconisons de procéder aux essais sur des pièces obtenues effectivement par formage direct.

### Pièces réalisées par «formage direct»

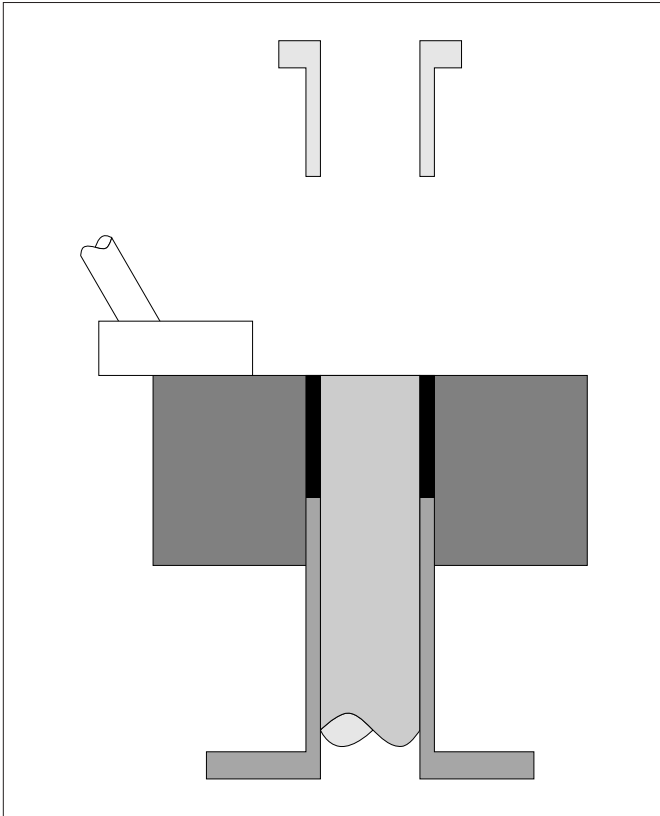
En principe, le procédé de formage direct mis au point par DuPont s'exécute en deux étapes.

Des presses verticales à genouillère, équipées de matrices de compression, produisent des pièces formées à partir de la poudre de polyimide. L'opération est très semblable à celle mise en oeuvre pour les céramiques. Toutefois, en raison de tolérances plus restreintes, le processus doit être parfaitement contrôlé et maintenu dans le cadre de paramètres serrés. Il faut tenir compte de l'écoulement de la poudre et du comportement élastique pour assurer l'homogénéité de la densité et la stabilité des dimensions.

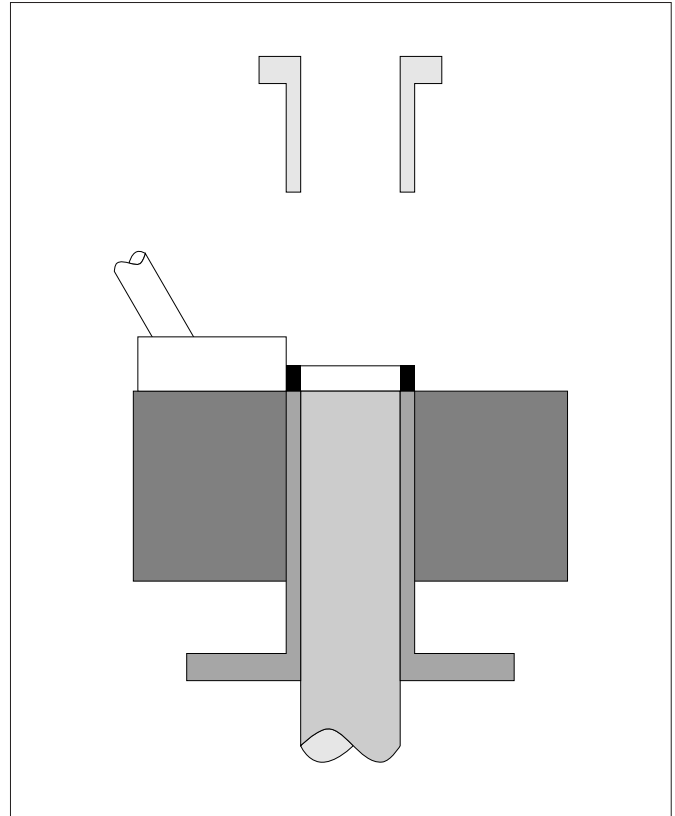
Le produit de cette opération est une pièce solide fabriquée en polyimide et comportant des ingrédients spécifiques déterminés en fonction des propriétés requises par les conditions réelles d'utilisation.

Ensuite, pour le frittage, les pièces agglomérées peuvent être regroupées en lots importants dans des caisses à claire-voie ou des conteneurs.

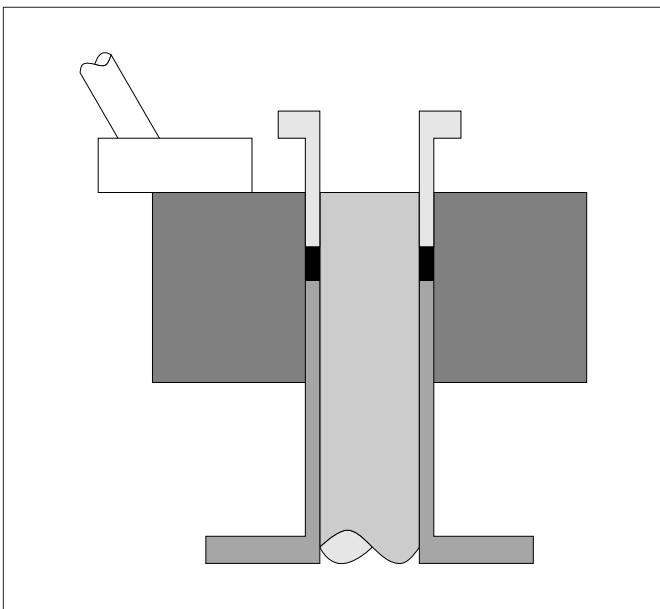
Stockées dans des conteneurs métalliques, les pièces sont placées dans de grands fours à fritter. Cette opération s'effectue à des températures élevées. Il faut donc veiller à éliminer toute présence d'oxygène. Quelques heures plus tard, le frittage est terminé : les pièces ont les propriétés finales requises.



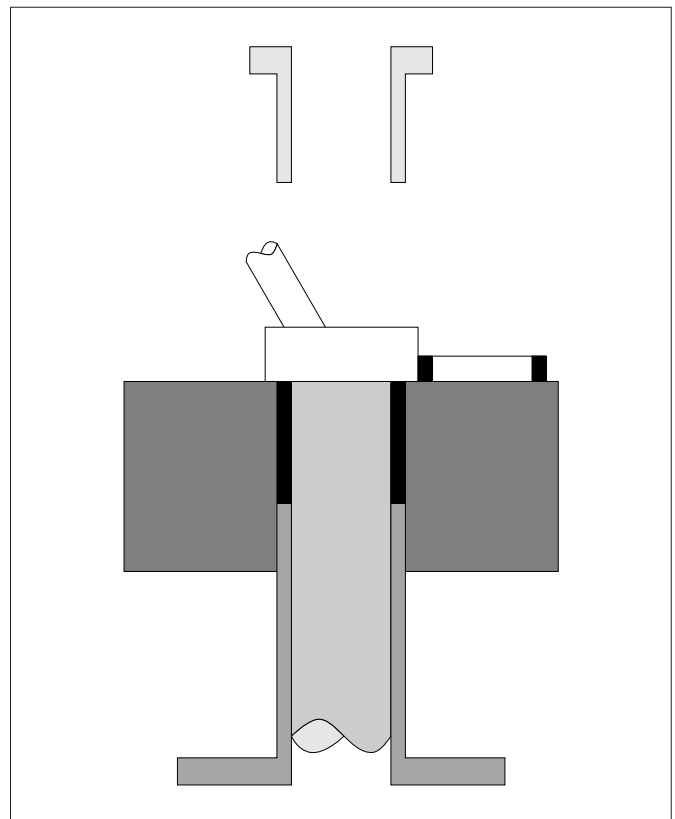
1. Le sabot de remplissage se retire une fois la matrice remplie de poudre. Les poinçons supérieur et inférieur se déplacent en position haute et basse.



3. Le poinçon supérieur remonte tandis que le poinçon inférieur expulse la pièce « agglomérée » hors de la matrice.



2. Les poinçons supérieur et inférieur se rapprochent l'un de l'autre pour comprimer la poudre et former la pièce.



4. Le poinçon inférieur redescend tandis que le sabot de remplissage s'avance au-dessus de la matrice pour l'alimenter en poudre, tout en poussant la pièce qui vient d'être expulsée.

Pendant le frittage, les pièces subissent un retrait conformément à la taille, à la forme et à la direction de la compression. Il faut tenir compte de ce retrait lors de la conception et de la fabrication de la matrice. Cela demande de vastes connaissances et une expérience approfondie, car différents additifs ont, en outre, une incidence sur le retrait tridimensionnel.

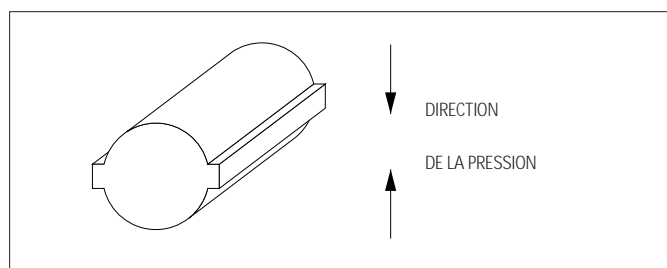
D'autres modifications interviennent pendant le retrait. La pièce agglomérée reflète nécessairement les caractéristiques et les empreintes de la matrice et des poinçons. Pendant le frittage, toutes les surfaces sont légèrement modifiées et montrent un profil de laminage dont la rugosité est approximativement Rz 7 (valeur métrique DIN 4786). Une coupe du profil de rugosité montre, au microscope, une surface semblable à des courbes légèrement sinusoïdales. Cela permet aux pièces VESPEL® de fonctionner en contact avec des pièces métalliques dans des paliers sans usinage supplémentaire des surfaces.

Les angles vifs de la pièce agglomérée sont arrondis selon un rayon de 0,05 mm, ce qui évite de concevoir les pièces avec des chanfreins comme c'est le cas pour les pièces métalliques.

En fonction de la demande du client, les pièces sont soumises à un contrôle final et pourvues de la documentation nécessaire. Elles sont ensuite prêtes pour l'usinage de finition ou pour l'emballage et l'expédition.

### Possibilités du formage direct

Pièce la plus mince	-1 mm
Pièce la plus épaisse	-58 mm*
Diamètre extérieur max.	-300 mm
Diamètre intérieur min.	-0,5 mm
Surface maximale	-2800 mm <sup>2</sup> peut être augmentée à -7000 mm <sup>2</sup> par chauffage de l'outil)
Etat de surface	-1 µm (Ra)
Méplat sur chanfreins	0-0,3 mm



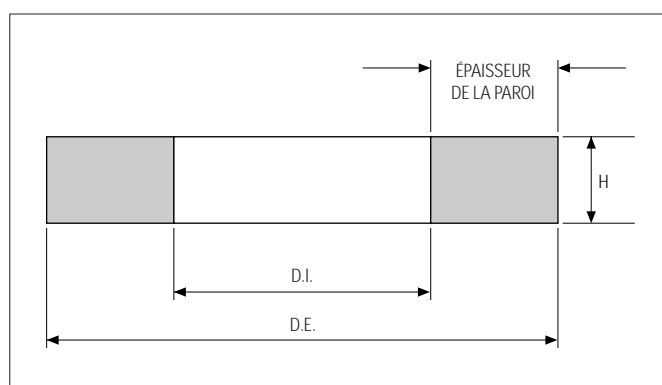
\* Les pièces cylindriques d'une longueur supérieure à 58 mm peuvent être formées horizontalement au lieu de l'être verticalement. Toutefois, ces pièces auront deux méplats (voir schéma).

## Recommandations relatives aux tolérances et à la conception en général

Vous trouverez ci-après des recommandations relatives aux tolérances et à la conception des pièces réalisées par formage direct. Toutefois, il peut y avoir des variations et des exceptions, chaque pièce étant étudiée séparément en tenant compte de sa fonction et de l'environnement d'exploitation.

### Tolérances standard

Dimension	Tolérance standard
Diamètre, mm	µm
7,5 - 12,5	± 40
12,5 - 19	± 50
> 19	± 65
Hauteur, mm	µm
0,4 - 2,5	± 75
2,5 - 6,5	± 100
6,5 - 12,5	± 125
12,5 - 25	± 150



**Remarque :** pour tirer le meilleur parti des capacités de tolérance du VESPEL®, ne spécifiez pas le diamètre extérieur (DE) et le diamètre intérieur (DI), mais uniquement le diamètre le plus important et l'épaisseur de la paroi.

### Autres indications de tolérances (en mm)

Diamètre	Concentricité	Battement	Parallélisme	Planéité*
< 25,4	0,040	0,050	0,040	0,050
25,4-50,8	0,050	0,125	0,075	0,125
> 50,8	0,050 + <sup>1</sup>	0,125 + <sup>2</sup>	0,075 + <sup>3</sup>	0,125 + <sup>2</sup>

1 = 0,0005\* (d-50,8) mm  
2 = 0,005\* (d-50,8) mm  
3 = 0,001\* (d-50,8) mm

\* Pour des pièces simples

## Remarques relatives à la conception

**A**

Méplats sur chanfreins  
0-0,3

$\theta$  ( $30^\circ \pm 2^\circ$  recommandé)

$D_{\max} = 0,15 H$

$D_{\max} = 0,3 H$

**B**

Les pièces simples (douilles et rondelles, par exemple) que l'on peut réaliser avec des poinçons droits réduisent la maintenance.

**C**

A ÉVITER

45° min.

Recommandé 60°

0-0,3

$D$

$H$

$D$

RECOMMANDÉ

a. Il faut éviter les chanfreins dont l'angle est inférieur ou égal à  $45^\circ$  par rapport à la verticale.

b. Il y a lieu de prévoir des méplats (0 à 0,3 mm) à la base de tous les chanfreins inclinés de  $45^\circ$  à  $60^\circ$ .

c. La limite admissible pour la profondeur «P» d'un chanfrein ou la profondeur totale des chanfreins aux deux extrémités d'une pièce est de 30% de la hauteur «H» de la pièce.

**D**

1,25 min.

15° max.

Dans la plupart des cas, il est possible de ménager un angle aigu ( $15^\circ$  maximum) sur le poinçon de formage afin de guider la pénétration. Pour éviter le coincement du poinçon supérieur, il faut disposer d'une petite partie parallèle (1,25 mm minimum) au-dessus de l'angle aigu.

**E**

a.

A ÉVITER

b.

RECOMMANDÉ

a. Il est impossible, en formage direct, de réaliser des contre-dépouilles.

b. Un congé (rayon de 0 à 0,5 mm) est nécessaire entre la colle-rette et le fût de la pièce.

A ÉVITER

RECOMMANDÉ

**F**

Voir détail

0,3 H max.

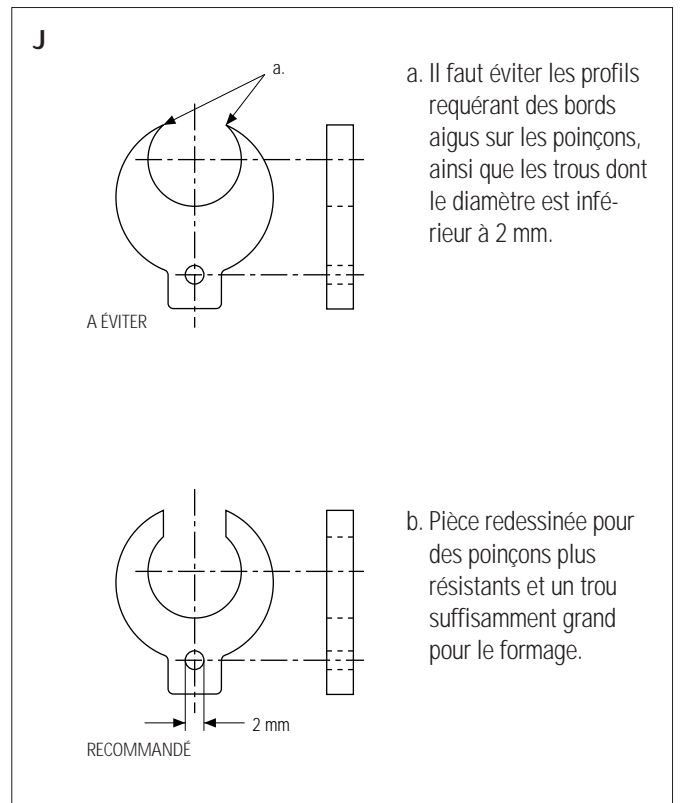
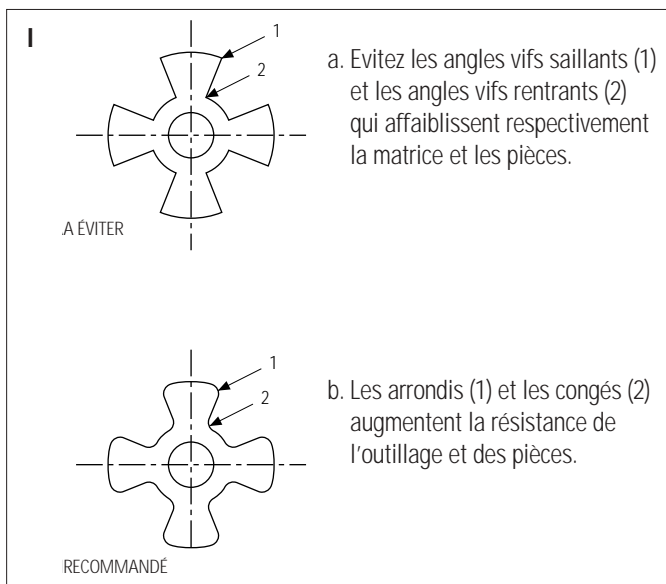
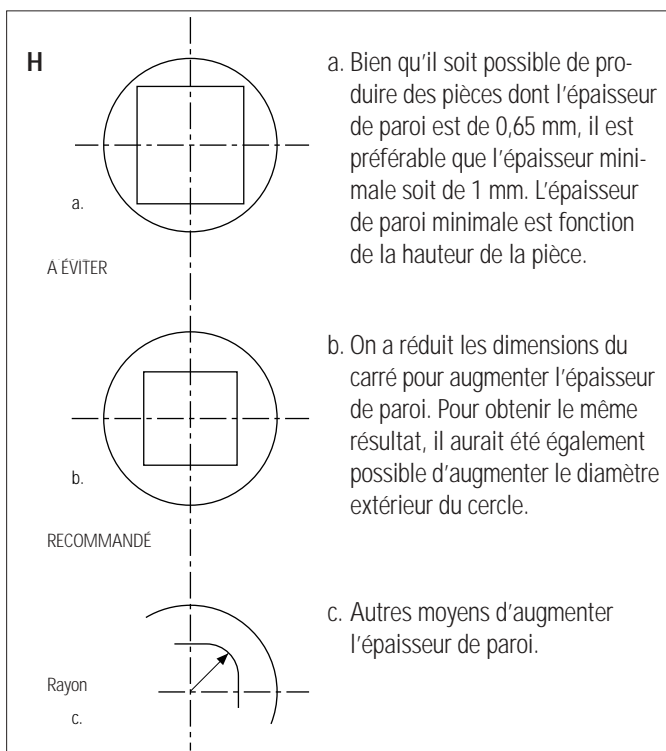
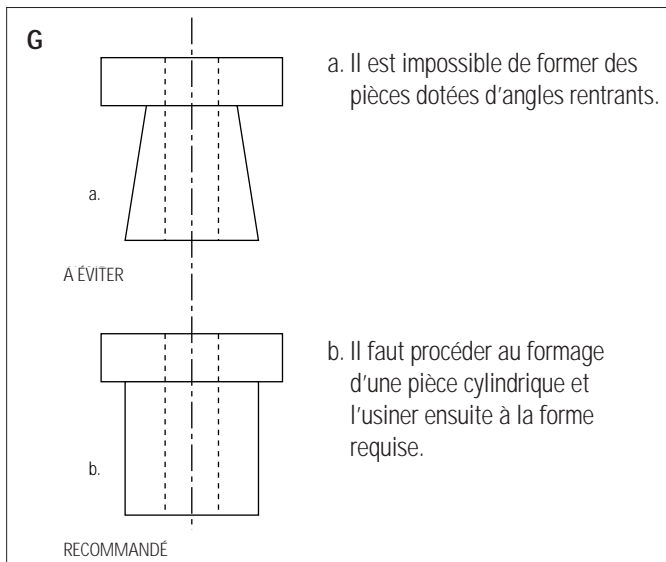
$H$

Détail

R

Typique

Il est possible d'obtenir par formage des rainures incurvées ou semi-circulaires jusqu'à une profondeur maximale de 30% de la hauteur totale de la pièce.



## Pièces réalisées par «formage direct» et reprises par usinage

Le formage direct s'effectuant sur des presses verticales, la conception des pièces est limitée par la course unidimensionnelle de la presse.

Ceci explique les restrictions imposées à la forme des produits moulés. Les pièces ne peuvent pas comporter de contre-dépouilles perpendiculaires à la direction de la compression, car il serait ensuite impossible de les éjecter.

A l'inverse de nombreux polymères, le VESPEL® est facile à usiner avec les outils standard prévus à cet effet. Toute opération de coupe peut être effectuée sans difficulté avec pour résultat des surfaces très lisses.

DuPont peut prendre en charge l'usinage à la demande du client ou ce dernier peut s'adresser à l'atelier de son choix.

En règle générale, les pièces usinées VESPEL® peuvent atteindre des tolérances de qualité 8 (voir annexe B, «Tolérances ISO»).

## Pièces usinées

DuPont fabrique les semi-produits VESPEL® à partir des résines polyimides SP à hautes performances. Ces semi-produits sont disponibles sous forme de rondins, tubes, plaques, bagues, disques et barres (voir annexe A).

Les pièces usinées à partir des semi-produits VESPEL® conviennent parfaitement aux prototypes, aux petites séries ou aux pièces à géométrie complexe. Notez cependant qu'à partir de 1000 pièces, il est souvent plus économique de recourir au procédé de formage direct de DuPont.

Il est très important, lors des essais d'application du VESPEL®, d'utiliser le matériau (semi-produit ou formage direct) qui sera finalement commercialisé. Pour cette raison, DuPont propose des ébauches cylindriques réalisées par formage direct pour les prototypes.

Aucun semi-produit fabriqué à partir de polyimides ST n'est encore disponible.

## Procédures d'usinage

Les pièces et semi-produits VESPEL® sont d'un usinage relativement aisé en raison de la résistance mécanique, de la rigidité et de la stabilité dimensionnelle qui leur sont propres aux températures d'usinage. En outre, ils peuvent être usinés en faisant appel aux machines classiques de travail des métaux pour obtenir des pièces respectant des tolérances que l'on considère comme particulièrement serrées pour des matières plastiques. Dans la plupart des cas, les techniques utilisées pour l'usinage des métaux sont directement applicables.

### Outillage conseillé

- **Outils au carbure:** grade C-2.
- **Kennametal K-11, Carbaloy 895** ou équivalent: lorsque la durée de service de l'outillage est particulièrement importante.
- **Acier rapide:** pour les petites séries dans le cas d'outils à tranchants multiples tels que les fraises en bout, les chanfreineuses et les alésoirs.

### Remarques

- **Echauffement excessif:** il ne faut pas excéder une température telle que l'on ne puisse saisir la pièce à la main. En cas d'échauffement excessif, raffûtez l'outil et/ou réduisez l'avance.
- **Travaux légers:** utilisez des outils convenant à l'usinage du laiton.
- **Broutement:** affûtez les outils avec un angle de dégagement latéral positif de 0° à 5° et un angle de dépouille nul afin de réduire les risques de broutement de l'outil.
- **Opérations spéciales:** on est parvenu à fabriquer avec succès des pièces VESPEL® de grand diamètre et de faible épaisseur en respectant des tolérances étroites. Afin de garantir une stabilité dimensionnelle satisfaisante, la pièce peut être ébauchée à 0,4-0,5 mm des cotes définitives, puis conditionnée jusqu'à l'équilibre dans une atmosphère à 23°C et à 50% d'humidité relative avant l'usinage final.

### Fixation

La précaution essentielle à prendre pour la fixation des pièces et semi-produits VESPEL® lors de l'usinage consiste à éviter toute déformation due au dispositif de fixation, douille de serrage ou mandrin. Contrairement aux métaux, un plastique se déforme s'il est serré avec excès, et le VESPEL® ne fait pas exception à la règle.

### Dispositifs de fixation fiables

- **Douille de serrage intérieure ou extérieure:** dispositif de fixation le plus sûr, assurant une pression suffisante pour un bon maintien.
- **Mandrin:** il est recommandé d'adopter un mandrin à 6 mors qui permet de répartir uniformément la force de maintien.

## Sciage

Les pièces et semi-produits VESPEL® se scient aisément à l'aide de scies circulaires ou à ruban. Pour un meilleur résultat, tenez compte des indications suivantes:

### Scie circulaire

- Utilisez une lame bien affûtée sans «voie».
- On coupe sans difficulté des blocs de 75 mm d'épaisseur avec une scie de 25 cm de diamètre à denture au pas de 2 à 3 mm, avec une vitesse de coupe de 1800 à 2400 m/min et refroidissement à eau.

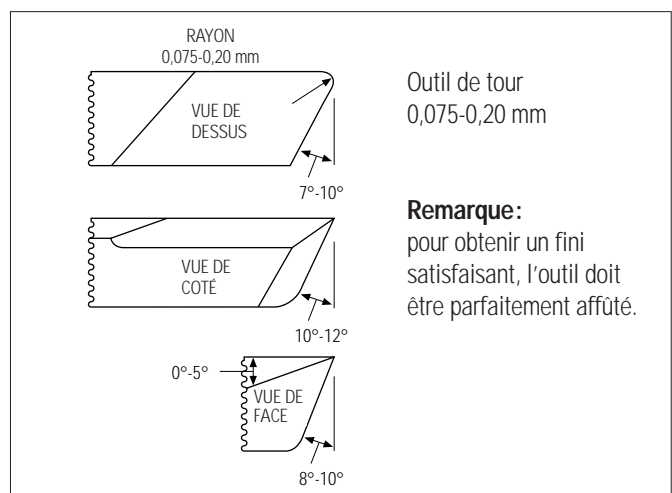
### Scie à ruban

- On coupe sans refroidissement des sections de VESPEL® de 125 mm d'épaisseur avec une scie à ruban bien affûtée à denture au pas de 2,5 mm, à voie standard.
- Pour les sections plus minces, il est recommandé d'employer des rubans à denture plus fine.
- Pour la plupart des compositions chargées, il convient d'utiliser des lames en alliages spéciaux.

## Tournage

Pour obtenir une bonne qualité de surface des pièces et semi-produits VESPEL®, tenez compte des indications suivantes:

- Utilisez les techniques habituelles du tournage (tour, décolleteuse ou machine à fileter).
- Utilisez des outils de coupe à plaquette de carbure pour les travaux exigeant des tolérances étroites.
- Les outils à brise-copeaux donnent de bons résultats.
- Maintenez le tranchant de l'outil parfaitement affûté, avec un rayon de pointe de 0,08 à 0,2 mm. Vérifiez l'affûtage en examinant le tranchant grossi 10 fois et, le cas échéant, aiguissez-le ainsi que le rayon de pointe au moyen d'un affiloir manuel au diamant calibre 800.
- Adoptez de préférence des vitesses du même ordre que celles employées pour l'usinage du laiton. Il est possible de faire varier ces vitesses dans une plage étendue en conservant les mêmes résultats satisfaisants.
- Il est possible d'utiliser un liquide de refroidissement pour réduire les effets thermiques et maintenir la stabilité dimensionnelle.
- La production d'un broutement peut être le signe d'un outil de coupe émoussé.



Conditions de fonctionnement du four	Avance transversale par tour (mm)
Tournage et dressage en dégrossissage	0,25 -0,50
Tournage et dressage de finition	0,25 -0,05
Alésage en dégrossissage	0,50 -0,1
Tronçonnage	0,075-0,20

### Fraisage

D'une manière générale, on peut adopter pour les pièces et semi-produits VESPEL® les conditions de travail utilisées pour le fraisage des métaux. Il y a lieu de prendre les mêmes précautions que pour les autres opérations d'usinage, à savoir éviter l'échauffement, assurer une bonne fixation des pièces, affûter correctement les outils, éviter d'inhaler les poussières, etc.

Pour éviter l'écaillage des bords, procédez comme suit:

- Soutenez-les avec des contrepèces réalisées dans un matériau différent.
- Travaillez de manière que le tranchant de la fraise attaque la pièce de l'extérieur vers l'intérieur.
- Ralentissez l'avance transversale afin qu'elle n'excède pas 50 mm/min lorsque l'outil débouche.
- Utilisez, chaque fois que possible, des fraises à dents rapportées qui donnent d'excellents résultats.

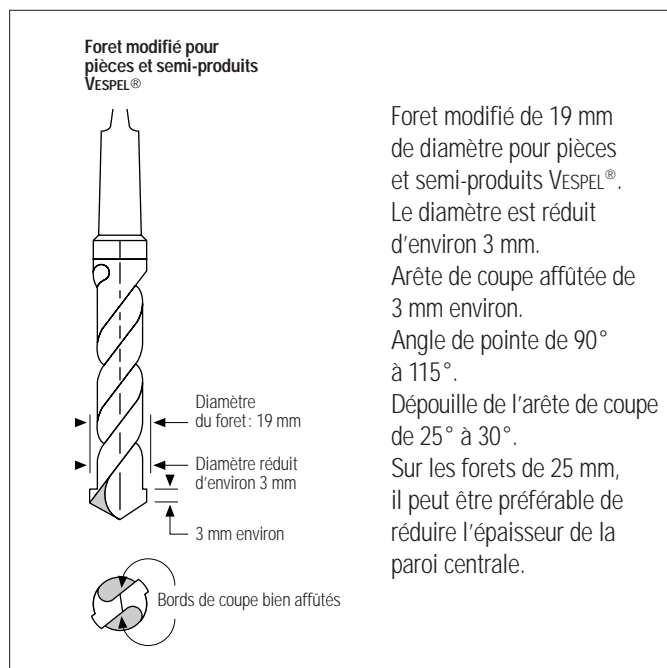
### Eviter l'écaillage

Pour percer des sections minces sans écaillage, tenez compte des indications suivantes:

- Utilisez un foret avec un angle de dépouille de 5° ou une fraise en bout. Réglez sur avance automatique, si possible, ou allégez la pression d'avance lorsque l'outil débouche. Des vitesses de 12 à 15 m/min produisent des résultats satisfaisants.

### Perçage

Le VESPEL® est plus élastique et présente un coefficient de dilatation thermique plus élevé que le métal. Il y a donc plus de risque de grippage du foret. En fonction des applications, les forets suivants, modifiés ou non, réduisent ce risque.



### • Foret hélicoïdal standard

Il peut servir à percer des trous de faible profondeur (jusqu'à la moitié du diamètre du foret environ). Au-delà de cette profondeur, le risque de grippage augmente.

### • Foret modifié

Il diffère du foret hélicoïdal en plusieurs points: en premier lieu, le diamètre est réduit sur toute la longueur du foret à l'exception des trois millimètres qui précèdent le cône de coupe. En deuxième lieu, l'angle de dépouille de l'arête de coupe est porté à 25-30° (au lieu des 12-15° standard).

En troisième lieu, dans le cas des forets de 25 mm et au-delà, il est possible de réduire le diamètre de la paroi centrale.

Le foret modifié permet de percer des trous présentant un fini soigné à des vitesses normalement adoptées pour l'acier doux.

### • Foret à langue d'aspic

Ce type de foret permet d'obtenir un état de surface satisfaisant tout en réduisant l'écaillage lorsque le foret débouche.

Il se peut que des bavures soient présentes à la sortie du trou après le perçage. Une deuxième opération d'usinage peut alors s'avérer nécessaire pour les éliminer. Sinon, se référer au paragraphe **Ebavurage**.

### Trous borgnes

Il est difficile de percer des trous borgnes de grande profondeur en respectant des tolérances serrées. Chaque fois que cela est possible, alésez au burin en dégrossissage. Il est possible d'utiliser un foret à canon associé à un liquide de refroidissement à haute pression pour dégager les copeaux.

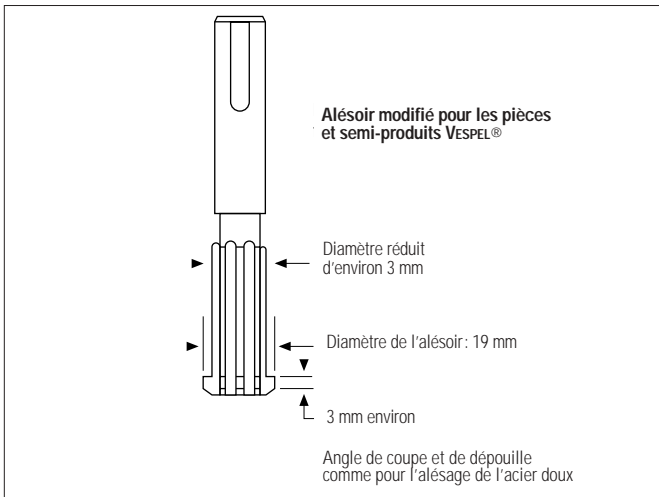
### Filetage

Les pièces et semi-produits VESPEL® peuvent être filetés à l'aide des tarauds standard utilisés pour les métaux. Il faut prendre les plus grandes précautions afin de ne pas échauffer la matière à un point tel que la dilatation thermique conduise au blocage du taraud. Si l'on dispose de l'atelier approprié, il est conseillé de procéder au filetage au tour avec un outil au carbure à une seule pointe de coupe et 30° d'avance composée, chaque fois que cela est possible. La profondeur ne doit pas excéder 0,13 mm à la première passe avec une réduction graduelle jusqu'à 0,05 mm par passe, jusqu'à achèvement de l'opération. Cette procédure allonge les cycles de production de chaque pièce, mais elle garantit une bonne qualité du filetage.

### Alésage

Comme pour le perçage, l'alésage des pièces et semi-produits VESPEL® requiert l'emploi d'un outil modifié (schéma ci-dessous) afin d'éviter le grippage. En raison d'un échauffement excessif, l'alésage peut produire un trou conique d'un diamètre supérieur de 0,025 à 0,05 mm au diamètre voulu.

Pour respecter des tolérances plus étroites, il est préférable d'effectuer l'alésage au burin. Il faut laisser sur l'ébauche une épaisseur de matière d'au moins 0,4 mm pour l'alésage. Il est possible d'aléser à l'alésoir ou au burin des trous de grande profondeur en adoptant des techniques couramment utilisées pour l'acier doux.



### Rectification

Il est possible de meuler des pièces et semi-produits VESPEL® en respectant des tolérances étroites au moyen d'une rectifieuse de surface, à deux disques ou «sans centre». La vitesse de la table est de l'ordre de 24 m/min pour des passes de dégrossissage et de la moitié de cette valeur pour les passes de finition sur les rectifieuses de surface. Une meule de type 32A46-H8VG donne d'excellents résultats à des vitesses périphériques de 900 à 1200 m/min. La meule doit être dressée avec un outil au diamant comme pour la rectification de l'acier.

Les jets cylindriques et les petits tubes peuvent être préparés pour l'usinage sur les décolleteuses et les machines à fileter en faisant appel à la rectification «sans centre». Les installations standard utilisées pour les pièces en acier avec un débit important de liquide de refroidissement conviennent généralement très bien.

**Attention:** il faut éviter que l'échauffement soit tel que la pièce ne puisse être tenue à la main.

### Polissage et lustrage

On peut conférer aux surfaces des pièces VESPEL® un lustre brillant en utilisant des tampons de mousseline classiques. L'opération ne requiert aucune précaution particulière autre que celles que l'on prend habituellement lors du polissage.

### Ebavurage

Les méthodes d'ébavurage applicables aux pièces métalliques conviennent aussi aux pièces VESPEL®. Il est également possible de les ébavurer dans des machines, par vibration ou par rotation, avec un mélange de produit abrasif, de détergent spécifique et d'eau.

### Rodage

Afin d'éviter que les pièces et semi-produits VESPEL® s'imprègnent de composés à base d'oxyde d'aluminium ou de diamant, tenez compte des indications suivantes pour obtenir des surfaces planes et extrêmement lustrées:

- Employez un papier-émeri humide ou sec (tel que du Norton Tufback Durite, grain 600).
- Utilisez un marbre ou équivalent pour garantir la planéité.
- Vous pouvez employer une huile machine légère comme médium.
- Pour obtenir un meilleur fini, terminez par un polissage avec une toile à polir ultra-fine.

- Un polissage supplémentaire peut être obtenu en rodant les pièces et semi-produits VESPEL® sur du papier kraft ou de type «bloc de correspondance».

### Mesures de sécurité lors de l'usinage du SP211 chargé de TEFLON®

Les pièces et semi-produits VESPEL® fabriqués en résine SP211 contiennent 10% de résine TEFLON® PTFE en poids. Or, au cours des opérations d'usinage, des particules de PTFE peuvent se trouver en suspension dans l'air. Il convient donc de prendre les précautions suivantes:

- Lors de l'usinage ou de la coupe, utilisez un liquide de refroidissement (de préférence une huile de coupe ou une huile soluble dans l'eau). Ne poncez pas la résine SP211 sans système de ventilation approprié.
- Etant donné que les particules de PTFE en suspension dans l'air risquent de les contaminer, ne conservez sur vous ni cigarettes, ni tabac dans la zone située à proximité immédiate de l'atelier d'usinage.
- Evitez d'inhaler de la poussière et lavez-vous soigneusement les mains avant de fumer ou de manger.

Pour de plus amples informations, consultez l'annexe C, «Fiche de sécurité produit».

### Mesure des pièces

Bien que l'on puisse employer les mêmes instruments, les techniques de mesure des pièces VESPEL® diffèrent de celles des pièces métalliques en raison d'une tendance à la déformation accrue des pièces en plastique sous les contraintes exercées pendant la mesure. Les pièces doivent être conditionnées conformément à la méthode ASTM D 616, Procédure AA, selon laquelle les éprouvettes restent exposées à l'atmosphère ambiante du laboratoire pendant un minimum de 40 heures (température de 23°C et humidité relative de 50% ± 5).

### Palmer

Pour mesurer le diamètre extérieur d'une bague, il ne faut pas se servir du palmer de la manière habituelle (c'est-à-dire serrer le tambour jusqu'au blocage ou cliquetage du rochet), car la pression exercée risque de déformer la pièce et, par conséquent, de fausser la mesure. Il convient plutôt de régler le micromètre à la dimension minimale tolérée et d'essayer de passer la pièce dans l'intervalle, comme dans un calibre «mini». On doit pouvoir faire passer la pièce sans exercer aucune pression. Pour éviter la déformation des sections à paroi mince, il est possible d'insérer un tampon dans la pièce, en le calibrant correctement par rapport au diamètre interne de cette dernière.

### Calibre tampon

Lorsque l'on procède à la mesure des diamètres de trous avec un tampon, il faut éviter de forcer ce dernier dans le trou. (Il est tout à fait possible de forcer un tampon dans un trou dont le diamètre est inférieur à celui du calibre et la différence peut atteindre 0,1 mm en fonction de la géométrie de la pièce.) En règle générale, il est préférable d'utiliser des tampons plutôt qu'une jauge micrométrique à cause des déformations qu'elle peut provoquer. Les jauges pneumatiques se prêtent parfaitement bien à la mesure des diamètres intérieurs.



Pour des mesures plus précises, il convient d'utiliser des instruments à capteur optique ou à palpeur.

### Étuvage

L'étuvage, ou traitement thermique, du VESPEL® est une procédure qui permet de libérer le matériau des contraintes introduites pendant la mise en œuvre et/ou l'usinage. Il s'agit de chauffer le matériau jusqu'à la température à laquelle sa structure moléculaire se modifie pour passer d'un état de contrainte élevé à un état de contrainte moindre. Cette variation s'accompagne normalement d'une réduction de volume du matériau.

Les contraintes présentes dans les différentes compositions de VESPEL® peuvent provenir des différences de mise en œuvre ou des plaques ou rondins utilisés. L'objectif est de réduire ces contraintes en chauffant graduellement le matériau jusqu'à une température dépassant la température maximale en service, de l'y maintenir pour assurer l'uniformité du chauffage dans tout le matériau, puis de refroidir ce dernier de manière progressive afin d'éviter les contraintes thermiques.

Comme la plupart des polymères, le VESPEL® subit une certaine dégradation thermique ou par oxydation au-dessus d'une certaine limite de température. Il convient donc de procéder à l'étuvage dans un four sous vide ou en atmosphère gazeuse.

### Procédure

**Remarque:** procédez systématiquement à un essai sur quelques pièces pour vérifier l'adéquation du matériau à la variation dimensionnelle.

Après l'étuvage, la pièce doit être capable de supporter les températures maximales en service sans variation dimensionnelle supplémentaire.

1. Usinez le VESPEL® à 0,5/1,5 mm des cotes définitives.
2. Placez le matériau dans le four sous vide ou en atmosphère gazeuse à température ambiante.
3. Chauffez le matériau en augmentant la température de 1 à 1,5°C par minute jusqu'à dépasser de 20°C la température maximale en service. Nous conseillons une température minimale d'étuvage de 150°C pour toute pièce dont la température en service est inférieure ou égale à 120°C.
4. Maintenez le matériau à cette température pendant 2 heures (3 heures pour les pièces dont une dimension minimale est supérieure ou égale à 25 mm).
5. Éteignez le four et laissez-y le matériau refroidir progressivement jusqu'à 70°C, porte fermée, avant de l'en sortir.
6. La pratique a montré que le meilleur moment pour l'étuvage se situe juste avant l'usinage de finition. Il est inutile de procéder à plusieurs opérations d'étuvage.
7. Toutes les températures s'entendent à  $\pm 3^\circ\text{C}$ .

Étant donné la nature de leur mise en œuvre, les plaques, rondins, tubes et barres doivent être soumis à une procédure d'étuvage s'il faut respecter des tolérances dimensionnelles inférieures à 3% et si l'on prévoit une exposition thermique. L'étuvage s'impose pour toutes les pièces et semi-produits usinés lorsqu'il s'agit de respecter des tolérances étroites.

Il n'est pas recommandé de monter la température d'étuvage au-dessus de 370°C sous peine de dégradation. De plus, il est probable que la relaxation des contraintes entraîne alors une dilatation thermique plus importante que la variation dimensionnelle.

### Collage

Plusieurs adhésifs permettent de coller les pièces VESPEL® entre elles, ainsi qu'à d'autres plastiques, des métaux ou des élastomères. Le choix de l'adhésif dépend de l'application et surtout de la température en service. Pour obtenir de bons résultats, il est essentiel de veiller à la propreté des surfaces à coller et de respecter les instructions d'utilisation fournies par le fabricant du produit adhésif. En outre, les surfaces à coller doivent présenter un profil raisonnablement similaire puisque l'adhérence optimale s'obtient en répartissant uniformément une mince couche d'adhésif.

### Types d'adhésifs

Les adhésifs époxy, phénoliques et polyimides ont fait leurs preuves avec les pièces VESPEL®.

### Préparation des surfaces

Pour préparer la surface des pièces VESPEL®, il convient de procéder uniquement au décapage mécanique par sablage.

Tout contaminant (salissures, huiles) doit être enlevé avec un solvant. Nous conseillons un nettoyage au perchloréthylène.

### Surmoulage et revêtement

Comme le VESPEL® ne fond pas, on peut tirer parti de cette caractéristique pour les pièces complexes ou de grandes dimensions en surmoulant un insert de VESPEL® avec un autre polymère technique moulable par injection.

L'emploi du VESPEL®, dont les propriétés supérieures sont mises à profit dans les zones où elles sont nécessaires, conjugué à celui d'une autre matière moulée par injection pour le reste de la pièce, peut constituer la solution la plus économique et la plus efficace pour répondre à vos contraintes techniques.

Il est également possible de doter les pièces VESPEL® à hautes performances d'un revêtement, de TEFLON® par exemple, afin de bénéficier de propriétés spécifiques supplémentaires.

### Résistance aux radiations

Ce bref aperçu montre que les pièces VESPEL® donnent toute satisfaction dans différents milieux radioactifs, même lorsqu'elles sont exposées à des doses relativement élevées. Les faibles pertes en poids, en résistance à la traction et en allongement constatées à des doses s'élevant jusqu'à  $1 \times 10^8$  rads, soulignent la possibilité de les utiliser en présence de faisceaux d'électrons ou de radiations gamma.

### Travail en présence de radiations

Un certain nombre d'applications techniques et industrielles s'exécutent dans des milieux soumis à diverses sources de radiations. Lorsque les émissions sont élevées, il est souvent nécessaire de recourir à la télémanipulation ou d'employer des machines automatiques afin d'assurer la protection du personnel. Or, les matériaux entrant dans la fabrication de ces équipements doivent résister à ces radiations.

Les métaux donnent de bons résultats dans les structures statiques, mais la nécessité de les lubrifier, avec les risques de contamination du lubrifiant que cela comporte, restreint leur utilité dans tout ce qui est paliers, douilles et surfaces de glissement. Dans le cas des applications requérant des pièces mobiles (systèmes de manipulation utilisés pour la production de produits radiochimiques ou pour les crayons combustibles, par exemple), les polymères autolubrifiants à hautes performances, dont font partie les pièces en polyimide VESPEL® SP, permettent de dépasser certaines des limites imposées par les pièces métalliques.

Les paragraphes suivants traitent des performances des pièces en polyimide VESPEL® SP soumises à différentes doses de radiations de nature diverse.

### Essais

Pour déterminer les performances des éprouvettes de VESPEL® obtenues par formage direct (SP1, SP21 et SP22) après exposition à des radiations, trois paramètres ont été évalués :

1. perte de poids ;
2. modification de la résistance à la traction et de l'allongement ;
3. par rapport à des éprouvettes de référence non exposées aux radiations et choisies de manière aléatoire.

**Rayonnement gamma :** émis par une source de cobalt 60 à un débit de dose de  $3,8 \times 10^6$  rads/h. Durées d'exposition : 16 minutes, 2,6 heures et 26,3 heures. Total des doses absorbées :  $10^6$ ,  $10^7$  et  $10^8$  rads.

**Faisceau électronique :** émis par un générateur électrostatique de Van de Graaff de 2 MV à un débit de dose de  $4 \times 10^6$  rads/h. Durées d'exposition : 1,6 minute, 80 minutes et 2,7 heures. Total des doses absorbées :  $10^6$ ,  $5 \times 10^7$  et  $10^8$  rads.

**Faisceau neutronique :** émis par un flux de neutrons de  $5 \times 10^{13}/\text{cm}^2/\text{s}$ . Les éprouvettes pour l'essai à la traction y ont été exposées pendant respectivement 100 et 150 heures. Un rayonnement gamma coïncident, à un débit de dose moyen de  $1,2 \times 10^8$  rads/h, accompagnait le faisceau de neutrons.

### Pièces VESPEL® soumises à un rayonnement gamma

#### Perte de poids

Exposées à un rayonnement gamma inférieur ou égal à  $1 \times 10^8$  rads, les éprouvettes de VESPEL® ont subi une perte de poids inférieure à 1%.

#### Résistance à la traction

Les éprouvettes pour l'essai à la traction ont subi une perte de résistance inférieure à 6,5% et ce, jusqu'au niveau maximum d'exposition de  $1 \times 10^8$  rads.

#### Allongement

Les trois formulations de VESPEL® ont subi de légères modifications de leur pourcentage d'allongement à la rupture. La perte la plus significative (19,2% par rapport aux éprouvettes de référence) s'est produite au niveau d'exposition le plus élevé.

### Pièces VESPEL® soumises à un faisceau électronique

#### Perte de poids

Exposées à un faisceau d'électrons inférieur ou égal à  $1 \times 10^8$  rads, les éprouvettes de VESPEL® ont subi une perte de poids inférieure à 2%.

#### Résistance à la traction

Les éprouvettes pour l'essai à la traction ont subi une perte de résistance inférieure à 4,5% et ce, jusqu'au niveau maximum d'exposition de  $1 \times 10^8$  rads.

#### Allongement

Les trois formulations de VESPEL® ont subi de légères modifications de leur pourcentage d'allongement à la rupture. Les pertes les plus significatives (moins de 15% par rapport aux éprouvettes de référence) se sont produites au niveau d'exposition le plus élevé.

### Pièces VESPEL® soumises à un faisceau neutronique

Bien qu'aucune des éprouvettes n'ait gonflé ou montré de déformation notable, la résistance à la traction a été fortement réduite après exposition à des doses élevées de rayonnement neutronique. En conséquence, nous vous conseillons de consulter un ingénieur commercial VESPEL® pour toute application dans un milieu de ce type et de procéder à des essais spécifiques d'exposition.

# Douilles et paliers

## Pour rentabiliser la conception, ayez le «réflexe VESPEL®»

Les ingénieurs et les commerciaux de la division VESPEL® de DuPont sont prêts à vous aider à tirer le meilleur parti des performances inégalées des pièces VESPEL®. Pour cela, il vous suffit d'écrire au bureau de vente le plus proche ou de prendre contact avec votre ingénieur commercial VESPEL®.

## Mettez le VESPEL® à l'œuvre dans votre système

Depuis plus de vingt ans, les paliers en polyimide VESPEL® SP de DuPont œuvrent sans relâche, allongeant la durée de vie des équipements et réduisant la maintenance par rapport aux matériaux classiques.

Les paliers VESPEL® constituent le choix le plus rentable pour une multitude d'applications, car ils sont tenaces, légers et résistent à l'usure et au fluage, même à des températures extrêmes. Nombreuses sont les conditions dans lesquelles ils surpassent les métaux et d'autres plastiques techniques.

La présente partie a pour objectif de vous aider à choisir le palier VESPEL® le mieux adapté à votre application. Elle comprend :

- des informations générales sur la conception du palier;
- une méthode pour déterminer la charge pression-vitesse (PV) dans votre application;
- des recommandations pour choisir le polyimide SP adapté aux charges PV rencontrées en pratique;
- des remarques relatives à la conception et l'utilisation des paliers VESPEL®;
- un exemple de problème de conception.

## Le VESPEL® comparé aux autres matériaux dans les applications de paliers

En règle générale, les performances d'un palier dans une application donnée dépendent de plusieurs critères, à savoir :

- le milieu ambiant, notamment en termes de température et de lubrification;
- la charge ou la pression appliquée sur la surface du palier;
- la vitesse de glissement des surfaces de contact par rapport au palier;
- la dureté et l'état de la surface de contact;
- le comportement au frottement du matériau pour palier;
- l'épaisseur du matériau pour palier, combinée à son aptitude à dissiper l'effet thermique du frottement.

Les pièces VESPEL®, avec ou sans lubrification, donnent entière satisfaction dans des conditions provoquant la destruction des autres matières plastiques et une usure grave de la plupart des métaux. Les paliers VESPEL® réduisent, voire éliminent les problèmes d'abrasion, de corrosion, d'adhérence, de fatigue et d'usure, fléaux des matières classiques, surtout lorsqu'elles sont utilisées sans lubrifiant.

Les paliers VESPEL® supportent des charges pression-vitesse (PV) supérieures à celles de la plupart des plastiques à hautes performances. De plus, ils excellent dans une vaste plage de

températures et de contraintes, car ils conservent leurs propriétés exceptionnelles de tenue au fluage et à l'abrasion et de résistance mécanique. Ils en ont fait preuve dans les milieux hostiles suivants :

- dans l'air et les gaz inertes à 370°C;
- en présence de radiations gamma et de faisceaux d'électrons;
- sous vide poussé (10-10 torrs);
- en présence de fluides hydrauliques et de carburateurs;
- en présence d'hydrogène liquide.

## A l'inverse des roulements à billes, à rouleaux et à aiguilles ordinaires, les paliers VESPEL® :

- ne nécessitent aucune lubrification externe;
- fonctionnent à des températures auxquelles les lubrifiants ne résistent pas;
- fonctionnent dans les milieux sales;
- réduisent le bruit, le poids et les coûts.

## Comparés aux paliers en bronze, en laiton et en métal poreux, les paliers VESPEL® :

- allongent la durée en service des autres éléments en éliminant l'usure métal sur métal;
- résistent à des combinaisons de température, pression et vitesse de glissement au-delà de la portée des métaux non lubrifiés;
- résistent au fluage et au matage;
- éliminent les problèmes de fuite de lubrifiant en présence de papier ou de tissu pelucheux.

## Comparés aux paliers fabriqués avec d'autres polymères, les paliers VESPEL® :

- fonctionnent à des températures, des pressions et des vitesses de glissement auxquelles les autres plastiques ne résistent pas;
- accroissent la résistance au fluage et au matage;
- s'usinent comme le laiton tout en permettant de respecter des tolérances plus serrées.

## Choix de la matière

### La charge PV, critère essentiel

Le PV est le produit de la charge ou pression (P) et de la vitesse de glissement (V). Un palier en plastique soumis à une charge PV croissante finit par atteindre un point de défaillance, dit «limite PV». Cette limite se traduit en général par une brusque augmentation de la vitesse d'usure.

Tant que l'on reste dans les limites de résistance mécanique de la matière, c'est la température de la surface du palier qui constitue en général le facteur le plus important pour établir la limite PV. En conséquence, tout ce qui a un impact sur la température de surface (coefficient de frottement, conductivité thermique, lubrification, température ambiante, jeu de contact) en aura un également sur la limite PV du palier.

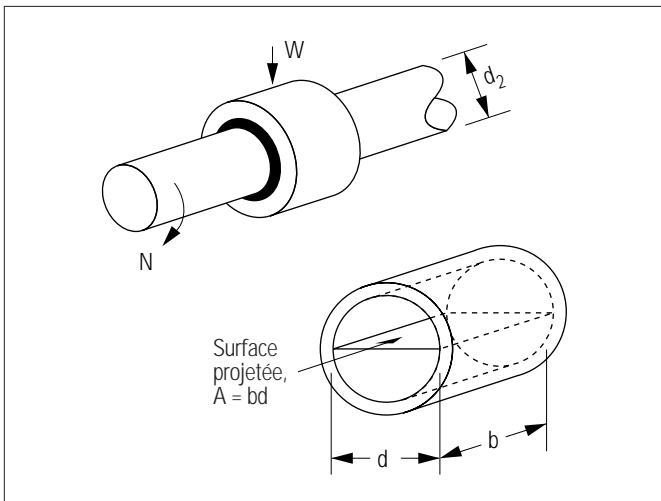
Pour évaluer la matière appropriée, la première étape consiste à déterminer si sa limite PV sera dépassée dans le cadre de votre application. En règle générale, il est prudent de prévoir de généreuses marges de sécurité lors du calcul des limites PV étant donné que les conditions réelles d'utilisation sont souvent plus difficiles que les conditions expérimentales.

### Détermination des conditions PV requises

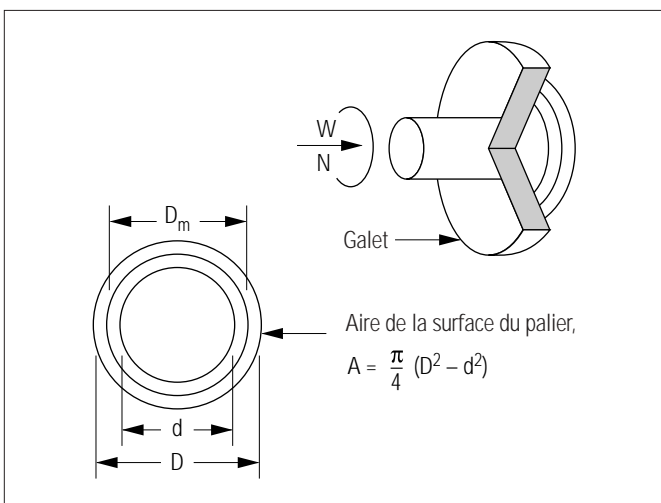
1. Déterminez d'abord la charge statique par unité de surface (P) à laquelle le palier doit résister en service:

- P = pression (MPa)
- W = charge statique (N)
- d = diamètre intérieur de la surface du palier (mm)
- B = longueur du palier (mm)
- N = vitesse de rotation (tr/min)
- D = diamètre extérieur de la surface du palier (mm)

Pour des paliers lisses:  $P = W / (d \times b)$



Pour des paliers de butée:  $P = 4W / \pi (D^2 - d^2)$



Dans les deux cas, la pression (P) ne doit pas excéder les valeurs indiquées ici à température ambiante:

### Pression statique admise

Composition	SP1		SP21	
	Usinage	Formage direct	Usinage	Formage direct
P, MPa	51	33	46	34

Composition	SP22		SP211	
	Usinage	Formage direct	Usinage	Formage direct
P, MPa	41	26	37	28

2. Ensuite, calculez la vitesse (V) du palier par rapport à la surface de contact:

	Palier lisse	Palier de butée
Rotation continue	$V = \pi (dN)/60$	$V = \pi (D_m N)/60$
Mouvement oscillaire	$V = \pi (dN) (\theta/180)/60$	$V = \pi (D_m N) (\theta/180)/60$

Où:

- N = vitesse de rotation (tr/min ou cycles/min)
- $D_m = (D + d)/2$  (m)
- $\theta$  = angle entre les limites d'oscillation (degré)
- V = vitesse de glissement (m/s)

3. Enfin, calculez le PV:

$$PV \text{ (MPa} \cdot \text{m/s)} = P \text{ (MPa)} \times V \text{ (m/s)}$$

### Limites PV des matériaux pour paliers non lubrifiés

Le tableau 6 indique les limites PV maximales pour les pièces VESPEL® non lubrifiées et plusieurs autres matières non lubrifiées dans des conditions de mouvement continu.

Des pièces VESPEL® correctement lubrifiées résistent à environ 40 MPa · m/s.

Tableau 6 Limites PV\*\*

Matière	Charge	MPa · m/s	Température max. contact (°C)
SP21	15% graphite	12	395
SP22	40% graphite	12	395
SP211	15% graphite	3,6	260
	10% PTFE		
PTFE*	Non chargé	0,064	260
PTFE*	15–25% verre	0,45	260
PTFE*	25% carbone	0,71	260
PTFE*	60% bronze	0,66	260
Nylon	Non chargé	0,14	150
Acétal	PTFE	0,27	120
	Non chargé	0,12	

\* A 0,5 m/s.

\*\* Ces valeurs sont fournies à titre indicatif. Les limites PV de toute matière varient en fonction des différentes combinaisons de pression et de vitesse, ainsi que d'autres conditions d'essai. Consultez la documentation du fabricant pour de plus amples informations.

## Conception des paliers VESPEL®

### Impact de la température de surface sur les caractéristiques d'usure

Le produit PV est une mesure extrêmement utile pour le choix de la matière appropriée à l'application de paliers, mais il ne suffit pas à caractériser la matière de manière adéquate. La température, la géométrie du système et la matière de la surface de contact jouent également un rôle très important dans l'usure des paliers.

Parmi ces facteurs, la température est en général le plus important. En effet, non seulement elle influe sur le coefficient de frottement, mais elle détermine aussi les combinaisons utilisables de pression-vitesse (PV). Les paliers VESPEL® se caractérisent par une usure modérée même si les produits PV sont élevés, à condition de prévoir un refroidissement suffisant. En revanche, l'usure peut être sévère, quel que soit le PV, si la température ambiante est trop élevée. Il est possible, à partir d'un facteur d'usure déterminé expérimentalement, de prévoir la résistance à l'usure d'un palier VESPEL® fonctionnant en dessous de ses limites de température utile. Pour obtenir ce facteur d'usure, on utilise la formule suivante qui met en relation le volume de matière usée sur une période donnée par unité de charge et de vitesse de glissement.

$$v = f(KFVT)$$

Où:

$v$  = volume de matière usée, mm<sup>3</sup>

$K$  = facteur d'usure, mm<sup>3</sup>/Nm  
fonction de l'état de surface et de la rugosité du contre matériau, de la température et de l'environnement

$F$  = charge supportée, N

$T$  = durée(s)

$V$  = vitesse, m/s

Pour les surfaces planes, la formule est modifiée:

$$X = f(KPVT)$$

Où:

$X$  = profondeur d'usure, mm

$P$  = pression, MPa

### Limites de fonctionnement

La vitesse d'usure du SP21 non lubrifié en service dans l'air est directement proportionnelle au produit pression-vitesse si la température de surface n'excède pas 395°C (voir figure 37).

Tant que la température reste en deçà de cette valeur critique, appelée «température de transition d'usure», le facteur de proportionnalité (dit «facteur d'usure») ne subit pas l'impact d'éventuelles modifications importantes des conditions de service. En dessous de la température de transition, l'usure est modérée. En revanche, dès que la température dépasse 395°C, le facteur d'usure augmente et devient très important à environ 540°C. Au-dessus de 540°C, le polyimide SP ne supporte plus aucune charge sans fluer.

Par contre, s'il s'agit simplement d'une pointe de température élevée, l'élément SP fonctionne normalement après réduction de la température à un niveau compatible. Cette diminution de la résistance à l'usure aux températures élevées est liée à la stabilité thermique du polyimide. Nous escomptons donc que la température de transition d'usure monte à 540°C dans un milieu inerte ou sous vide.

La figure 38 montre la courbe de pression-vitesse à 395°C de température de surface pour un palier de butée en SP21 fonctionnant dans l'air à 23°C contre de l'acier doux.

Notez que la limite PV varie de 1 MPa · m/s à 0,07 MPa à 12 MPa · m/s à 7 MPa.

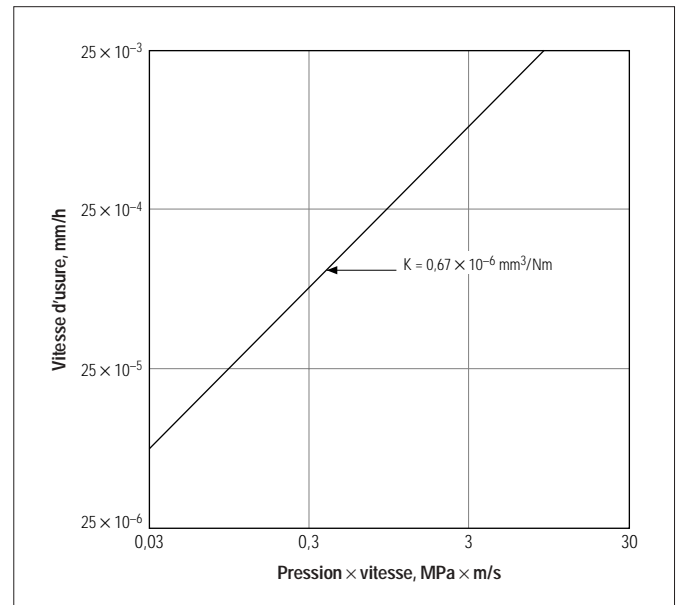


Fig. 37 Polyimide SP21 contre de l'acier au carbone: vitesse d'usure en fonction de la pression-vitesse. Essai sur palier de butée sans lubrification

$P = 0,07\text{-}22 \text{ MPa}$

$V = 0,025\text{-}5,0 \text{ m/s}$

Température de surface inférieure à 395°C.

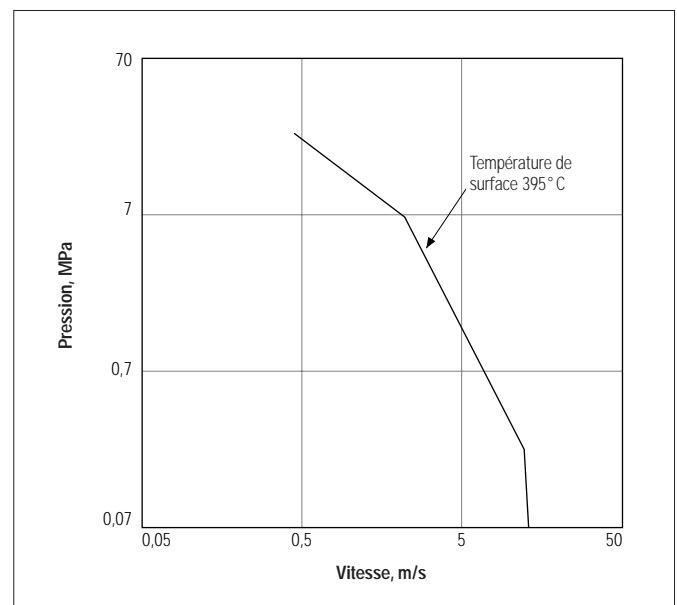


Fig. 38 Polyimide SP21 contre de l'acier au carbone: limite PV obtenue par essai sur palier de butée sans lubrification

## Comportement au frottement

La température, la pression et la vitesse influent sur le coefficient de frottement dynamique. Les coefficients de frottement types de nombreuses compositions de polyimide sont indiqués au tableau 7 ci-après.

Les coefficients de frottement des compositions chargées subissent une transition à environ 150°C (voir figure 39). En dessous de cette température, le comportement est similaire à celui du polyamide 66, mais au-delà de 150°C, les forces de frottement chutent brutalement et, dans la plage de 200 à 540°C, les caractéristiques relatives au frottement des compositions restent indépendantes de la température.

La température de transition de frottement n'est pas liée à celle de l'usure. L'ampleur de la transition et la vitesse d'usure en dessous de 150°C sont considérablement réduites pour le SP211.

Le concepteur doit prévoir des forces de frottement plus élevées susceptibles d'être présentes au démarrage et résultant de deux phénomènes distincts: 1) le transfert d'une couche de résine polyimide/composition chargée sur la surface de contact et 2) la transition de température des résines polyimides. Au redémarrage, le rodage d'une nouvelle couche ne s'impose pas nécessairement, mais l'effet thermique est réversible et se produit à chaque fois.

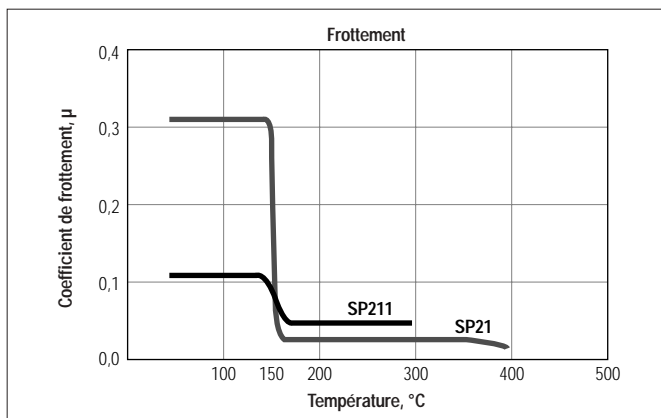


Fig. 39 Facteur d'usure du SP21 et du SP211 en service sans lubrification contre de l'acier doux au carbone

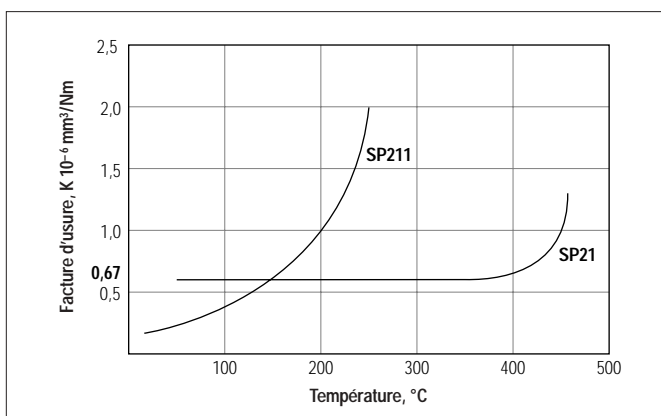


Fig. 40 Coefficient de frottement du SP21 et du SP211 en service sans lubrification contre de l'acier doux au carbone

Tableau 7 Coefficient de frottement types – essai sur des paliers de butée non lubrifiés

Mesure	Composition			
	PV (MPa · m/s)	SP21	SP22	SP211
Statique		0,30	0,27	0,20
P = 0,34 MPa V = 2,54 m/s	0,86	0,24	0,20	0,12
P = 0,69 MPa V = 0,51 m/s	0,35	0,35	–	0,24
P = 0,69 MPa V = 1,52 m/s	1,05	0,17	0,21	–
P = 0,69 MPa V = 5,08 m/s	3,5	0,07	0,09	0,08
P = 6,90 MPa V = 1,6 m/s	11	0,04	–	–

## Type de surface de contact et état de surface

La dureté de la surface de contact et son état exercent une influence considérable sur la résistance à l'usure des pièces VESPEL®. La vitesse d'usure des paliers non lubrifiés peut être réduite en augmentant la dureté de la surface de contact et en diminuant sa rugosité. En règle générale, il est préférable que la surface de contact ait été rectifiée, plutôt qu'usinée. De plus, un lustrage fin est souvent bénéfique. L'opération de finition doit s'effectuer dans la direction de la course du palier par rapport à la surface de contact. DuPont recommande un état de surface de 0,4 μm (Ra) et une dureté de Rc 55.

Acier et fonte sont en général de très bons contre matériaux pour toutes les compositions VESPEL®.

Un excellent comportement a été noté avec des aciers 100 Cr-6 et 20 Mn Cr-5 dans des applications de paliers et rondelles de frottement, en particulier dans les transmissions.

Etant donné leur faible dureté, cause d'usure rapide, l'aluminium et le zinc ne sont pas de bonnes surfaces de contact pour les paliers plastiques. Si l'on utilise l'aluminium, il faut le tremper ou, mieux encore, l'anodiser.

L'aluminium coulé sous pression à haute teneur en silice est très abrasif pour le VESPEL®.

Une nouvelle composition de polyimide, le SP221, a été récemment développée pour des applications en contact avec des matériaux tendres comme le bronze ou l'aluminium, en condition de frottement sec.

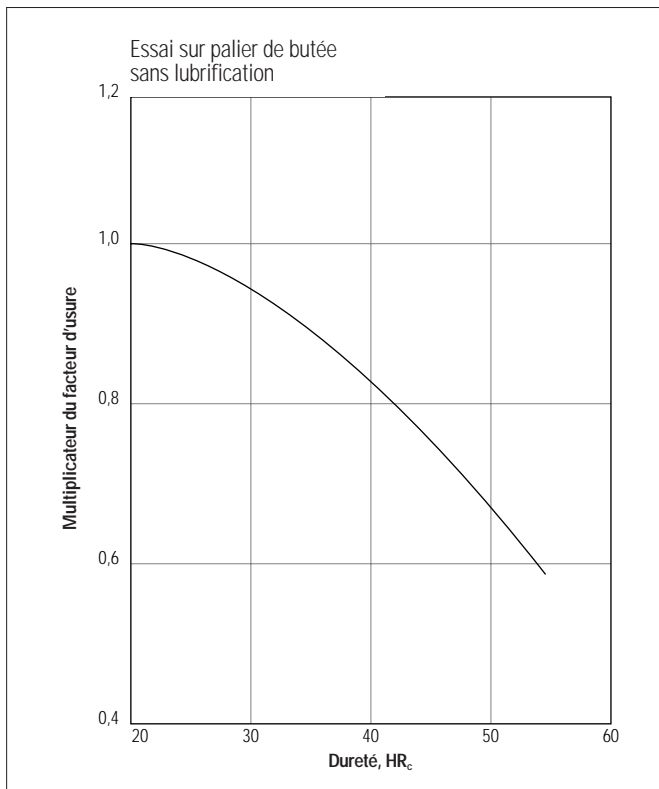


Fig. 41 Influence de la dureté de la surface de contact sur l'usure

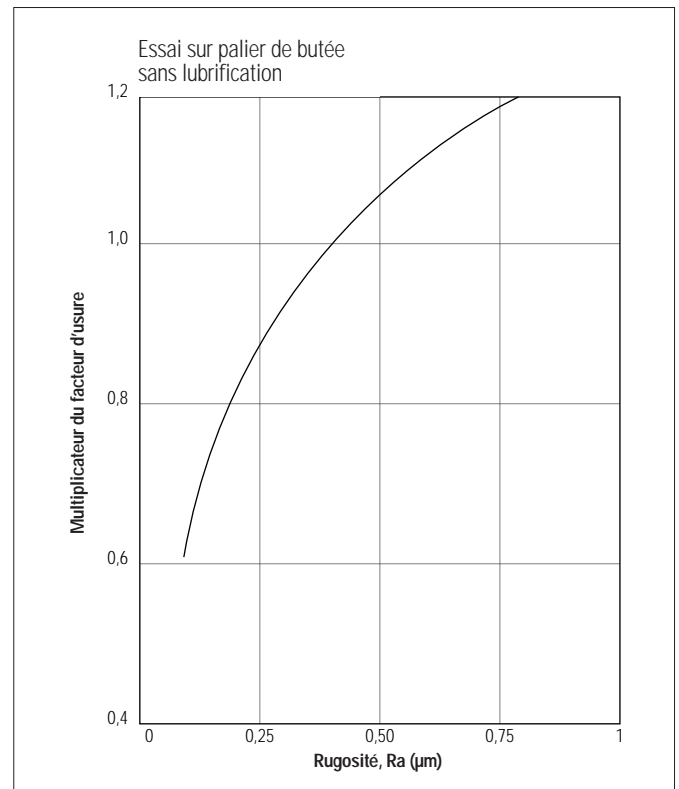


Fig. 42 Influence de l'état de la surface de contact sur l'usure

Les figures 41 et 42 illustrent l'impact de la dureté et de l'état de la surface de contact sur la tenue à l'usure.

Le plastique ne constitue pas un matériau de contact approprié pour les paliers VESPEL® et, dans le cas où il est utilisé, doit être réservé aux conditions de PV réduites. La faible dureté de la surface de contact en plastique peut conduire à une usure élevée. En outre, les plastiques étant des conducteurs thermiques relativement médiocres, les interfaces plastique/plastique s'échauffent plus que les interfaces plastique/métal. Les systèmes de paliers métal/plastique ont donc des limites PV supérieures à celles des systèmes plastique/plastique.

### Lubrification et autres remarques sur la conception des paliers

Pour déterminer si la lubrification s'impose ou non, il faut prendre en compte les points suivants :

- Une lubrification unique, consistant en un graissage initial ou l'emploi d'un lubrifiant à sec, réduit en général l'usure de rodage et améliore la résistance globale à l'usure.
- La lubrification des paliers peut augmenter la limite PV en réduisant le coefficient de frottement et en facilitant l'évacuation des débris d'usure. La circulation du lubrifiant peut permettre d'augmenter encore la limite PV en contribuant au refroidissement du palier.
- La lubrification au moyen d'un fluide chimiquement compatible mouillant les paliers VESPEL® réduit à la fois le frottement et l'usure. Cette réduction croît avec l'épaisseur du film fluide, qui elle-même augmente avec la viscosité du

fluide et la vitesse de glissement et décroît avec l'augmentation de la pression du palier. La géométrie de la pièce a également un impact sur la réduction du frottement. Les lubrifiants à film mince sont également en mesure de réduire la vitesse d'usure à sec d'un facteur de 10 ou plus. Les films épais, qui séparent complètement les surfaces de contact solides, sont capables théoriquement de réduire l'usure à des proportions négligeables.

- Le comportement au frottement d'un système de palier mettant en œuvre une lubrification par film mince est conditionné par les propriétés du matériau pour palier et celles du lubrifiant. Dans le cas de la lubrification par film épais, seules importent les propriétés du lubrifiant.

Tableau 8 Coefficient de dilatation thermique  $\alpha_{SP}$

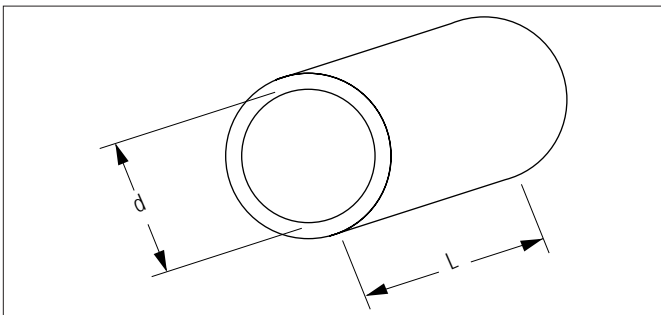
Composition	SP1		SP21	
	Semi produit	Formage direct	Semi produit	Formage direct
$\alpha_{SP}$ $10^{-6} \text{ m/m/}^{\circ}\text{C}$	54	50	49	41

SP22		SP211		ST2010	ST2030
Semi produit	Formage direct	Semi produit	Formage direct	Formage direct	Formage direct
38	27	54	41	48	32

- Les paliers non lubrifiés peuvent être pourvus de rainures en surface afin d'évacuer les débris d'usure. Pour les paliers lubrifiés, ces rainures peuvent permettre d'accroître l'apport en lubrifiant. Il faut tenir compte de l'effet des rainures sur la pression du palier.
- Comme elle ne mouille pas la résine SP, l'eau ne constitue ni un film mince, ni un lubrifiant de surface efficace pour les paliers VESPEL®. Au contraire, l'eau peut même avoir un effet négatif sur la vitesse d'usure des paliers à sec, sans toutefois qu'un contact accidentel soit problématique.
- L'utilisation des paliers VESPEL® non lubrifiés avec de l'azote peut réduire la vitesse d'usure à une valeur inférieure de 20% par rapport à celle de la mesure correspondante dans l'air. En outre, le fonctionnement dans l'azote peut augmenter la température de transition d'usure d'au moins 50°C par rapport à la valeur correspondante dans l'air.
- Dans le cas des applications de paliers dans des milieux sales, il convient de prévoir un dispositif d'étanchéité ou de nettoyage continu afin d'éviter la contamination des surfaces.

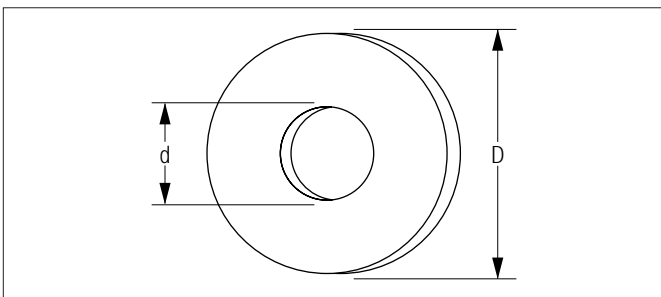
### Proportions

**Paliers lisses:** Pour assurer des performances optimales, nous conseillons des rapports  $l/d$  (longueur/diamètre) de l'ordre de  $1/2$  à  $3/2$ . Si le palier doit être particulièrement long, il peut être préférable d'en utiliser deux, séparés par un intervalle. Des valeurs  $l/d$  réduites présentent les avantages suivants:



- évacuation plus efficace des débris;
- sensibilité moindre à la déformation ou au défaut d'alignement de l'arbre;
- meilleure dissipation thermique;
- coûts de fabrication réduits.

**Paliers de butée:** Pour assurer des performances optimales, il est préférable de ne pas excéder un rapport diamètre externe/diamètre interne ( $D/d$ ) de 2. Des rapports supérieurs sont susceptibles de provoquer une surchauffe à la périphérie. En outre, des problèmes peuvent survenir en raison d'un défaut de planéité et de la présence de débris d'usure non évacués.



### Jeu de fonctionnement pour les paliers lisses

Le VESPEL® présente des coefficients de dilatation thermique bien inférieurs à ceux de la plupart des plastiques. Néanmoins il faut doter les paliers d'un jeu de fonctionnement minimal. Pour les paliers lisses VESPEL®, les jeux de fonctionnement représentent normalement de 0,3% à 0,5% du diamètre de l'arbre en fonction de l'application. En règle générale, plus les charges sont importantes, plus les jeux doivent l'être. Il est possible de réduire les jeux de fonctionnement en dotant le palier d'une coupe afin de permettre une dilatation thermique périphérique.

Pour calculer le diamètre intérieur lors de la conception du palier VESPEL®, il est important d'estimer la température réelle au niveau de l'arbre et de la surface du palier. Le dégagement thermique dû au frottement doit être ajouté à la température ambiante. Dans un large éventail d'applications, la dilatation thermique du logement est négligeable mais peut être prise en compte dans le cas de températures ambiantes élevées.

La formule suivante, qui permet de calculer le diamètre intérieur, doit être utilisée à titre indicatif. Pour des calculs plus précis, contactez votre représentant local DuPont (voir les coefficients de dilatation thermique au tableau 8).

Diamètre intérieur du palier (DI) = diamètre de l'arbre à température ambiante + variation du diamètre de l'arbre en fonction de celle de la température + jeu de fonctionnement de l'arbre + variation de l'épaisseur de paroi du palier en fonction de la température, soit:

$$ID = D (1 + \alpha S \Delta T_1 + C) + 2t \alpha SP \Delta T_2$$

Où:

D = diamètre de l'arbre à température ambiante.

C = jeu de fonctionnement de l'arbre (en pourcentage du diamètre de l'arbre).

$\alpha S$  = coefficient de dilatation du matériau de l'arbre.

$\alpha SP$  = coefficient de dilatation thermique du palier VESPEL®.

t = épaisseur de paroi du palier VESPEL®.

$\Delta T_1$  = augmentation de température de l'arbre.

$\Delta T_2$  = augmentation de température du palier.

En règle générale, il n'y a pas lieu de tenir compte de l'humidité pour régler les jeux de fonctionnement des paliers VESPEL®, car les polyimides en absorbent très peu (voir les courbes d'absorption d'humidité des figures 23 à 25).

Naturellement, les limites PV et les températures maximales d'utilisation de tout matériau diffèrent d'une application à l'autre en fonction d'un certain nombre de facteurs. D'où la nécessité de procéder à des essais approfondis afin de déterminer les performances des pièces en VESPEL® dans le cadre de votre application.

### Épaisseur de paroi des paliers lisses

Les parois des paliers lisses VESPEL® doivent être aussi minces que possible, car ainsi:

- elles améliorent la dissipation de la chaleur de friction;
- elles réduisent les modifications du jeu de fonctionnement résultant des variations dimensionnelles imputables à la chaleur et à l'humidité;
- elles réduisent la déformation sous charge élevée.



Pour la plupart des applications, l'épaisseur de paroi type des paliers VESPEL® est comprise entre 1 et 2,5 mm.

### Installation des paliers lisses

Les paliers lisses VESPEL® peuvent être installés avec un dispositif mécanique ou un adhésif.

Pour ajuster les paliers VESPEL® dans le métal, utilisez de préférence une faible interférence. Une fois le palier en place, son diamètre intérieur est réduit de 90% à 110% (en fonction de l'épaisseur de paroi, du diamètre et de l'interférence), avec pour résultat une légère charge de compression sur la paroi du palier. L'interférence type est de 0,5%, mais doit dans tous les cas être adaptée aux besoins de l'application.

La plupart des adhésifs commercialisés peuvent être utilisés avec les pièces VESPEL®. Pour de plus amples informations, notamment sur le choix de l'adhésif et la préparation des surfaces, reportez-vous au paragraphe «Collage». Quel que soit l'adhésif retenu, il est important, pour obtenir de bons résultats, de suivre les instructions fournies par le fabricant.

### Exemple de problème de conception

Considérons l'emploi de paliers VESPEL® pour un dessiccateur dans les conditions suivantes:

- Deux paliers sur un arbre de 38 mm doivent supporter une charge de 17 800 N, dans une plage de température allant de 21°C à 274°C.
- La longueur de palier maximale est de 38 mm et le maximum de jeu de fonctionnement autorisé est de 0,40 mm à chaud et à froid.
- Pour prévenir toute contamination du produit, les paliers ne peuvent pas être lubrifiés et ils doivent fonctionner sans maintenance 40 heures par semaine pendant 3 ans.
- L'arbre du dessiccateur effectue des rotations intermittentes de 5% du temps en fonctionnement à 20 tr/min et de 95% du temps à l'arrêt.

Les paliers VESPEL® satisfont-ils à ces exigences? Consultez d'ores et déjà les indications de limites PV au tableau 6.

### Solution

#### 1. Vérifiez la limite de température.

La température de surface maximale dans l'air pour le SP21 est de 395°C, donc, à moins que le PV soit très élevé, la température de surface ne doit pas augmenter de plus de 119°C, différence entre 274°C et 395°C.

#### 2. Vérifiez le produit PV.

Calculez la pression du palier:

$$P = \frac{F}{LD} = \frac{8900 \text{ N (par palier)}}{38 \text{ mm} \times 38 \text{ mm}} = 6,163 \text{ MPa.}$$

Calculez la vitesse de l'arbre:

$$V = \pi \cdot DN = \frac{\pi \times 0,038 \text{ m} \times 20 \text{ rpm}}{60} = 0,04 \text{ m/s}$$

Calculez le produit PV:

$$PV = 6,163 \text{ MPa} \times 0,04 \text{ m/s} = 0,245 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$$

A ce faible niveau de PV, le SP21 fonctionnera à un régime d'usure modérée. Le produit PV n'atteindra pas sa limite, en particulier si l'on tient compte du fonctionnement intermittent.

### 3. Vérifiez la résistance à l'usure.

Calculez la durée de service:

$$T = 0,05 \times \frac{40 \text{ heures}}{\text{semaine}} \times \frac{52 \text{ semaines}}{\text{année}} \times 3 \text{ années} = 312 \text{ heures}$$

$$\begin{aligned} \text{Usure radiale} &= \text{facteur d'usure}^* \times PV \times \text{durée en service} = \\ &= 0,67 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm} \times 0,245 \text{ MPa} \cdot \text{m/s} \times 1123200 \text{ s} = \\ &= 0,183 \text{ mm} \end{aligned}$$

\* Considéré comme  $0,67 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  dans ce cas.

Cette usure est inférieure au jeu de fonctionnement maximum autorisé. Si la différence est suffisante pour faire face à la dilatation thermique, les pièces Vespel répondront aux contraintes.

### 4. Déterminez le jeu à température ambiante.

A ce stade, l'expérience et le bon sens jouent un rôle important, puisque l'on ne peut ici qu'estimer une solution. L'expérience montre que l'arbre, la surface et le diamètre extérieur du palier, ainsi que le logement atteignent des températures différentes en service.

Supposons que:

- la surface de contact atteigne 56°C de plus que la température du dessiccateur, mais que:
- la température moyenne du corps du palier soit seulement de 28°C plus élevée que celle du dessiccateur, tandis que:
- le logement reste à température ambiante et comprime fermement le palier, de sorte que:
- le palier se dilate vers l'intérieur lorsque la température augmente, et que:
- l'arbre se dilate vers l'extérieur.

Compte tenu de ces hypothèses, on peut calculer le jeu initial (Cd) à température ambiante en appliquant la formule suivante:

$$C_d = D (\alpha_S \Delta T_1 + C) + 2 t \alpha_{SP} \Delta T_2$$

Où:

D = diamètre de l'arbre.

$\alpha_S$  = coefficient de dilatation thermique de l'arbre =  $11 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$ .

C = jeu de fonctionnement (ici 0,1%).

t = épaisseur de paroi du palier.

$\alpha_{SP}$  = coefficient de dilatation thermique pour le palier = SP21 =  $41 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$ .

$\Delta T_1$  = augmentation de température de l'arbre.

$\Delta T_2$  = augmentation de température du palier.

Si l'on prend une épaisseur de paroi de 1,59 mm, on obtient:

$$\begin{aligned} C_d &= 38 [11 \times 10^{-6} \cdot (330 - 21) + 0,001] + \\ &= (2 \times 1,59 \times 41 \times 10^{-6}) \times (302 - 21) = \\ &= 0,167 \text{ mm} + 0,037 \text{ mm} = 0,204 \text{ mm} \end{aligned}$$

## 5. Vérifiez le jeu maximal

Le jeu initial ajouté à l'usure au bout de trois ans donnera :

$$0,204 + 0,183 = 0,387 \text{ mm}$$

soit une valeur inférieure à la contrainte imposée.

En conclusion, les paliers VESPEL® répondent aux conditions de fonctionnement sans lubrification et aux températures élevées exigées par cette application.

Si vous rencontrez des problèmes de dilatation thermique, effectuez une coupe dans le palier.

## Paliers lubrifiés

Les pièces VESPEL® ont également un excellent comportement en service lorsqu'elles sont lubrifiées. Dans le cas d'une lubrification intégrale hydrodynamique (film épais), l'usure mécanique normale est nulle et les pièces VESPEL® fonctionnent aussi bien que tous les autres paliers fabriqués avec des matériaux classiques. Dans le cas d'une lubrification limite (film mince), les caractéristiques d'usure (et de frottement) du SP sont modifiées par le lubrifiant. L'action combinée de la séparation partielle et de la modification chimique des surfaces exerce une influence sur les performances. La viscosité dynamique du lubrifiant (Z), la vitesse (N) et la pression de la surface de contact (P) conditionnent l'épaisseur du film lubrifiant, qui détermine à son tour l'efficacité du palier VESPEL®.

Le facteur d'usure d'un palier de butée SP21 lubrifié par film mince décroît rapidement lorsque le rapport ZN/P augmente (paramètre sans dimension conditionnant l'épaisseur du film). La figure 43 permet de comparer les résultats obtenus avec des surfaces lubrifiées en SP21, en bronze et en régule (alliage plomb-étain). A l'exception des films extrêmement minces, la valeur du facteur d'usure du SP21 est de 0,2 à  $0,4 \times 10^{-7}$ , soit une valeur nettement meilleure que celle du bronze et approximativement équivalente à celle de l'alliage plomb-étain pour la plupart des épaisseurs de film.

Néanmoins, le SP se révèle supérieur à ces deux matériaux classiques lorsque les films sont minces ( $ZN/P < 3$ ). Nous ne connaissons malheureusement pas assez le mécanisme des interactions entre solides et liquides pour prévoir avec certitude l'usure dans toutes les conditions de lubrification par film mince.

Les figures 44, 45 et 46 représentent les variations du coefficient de frottement en fonction du rapport ZN/P pour les trois matériaux. Là encore, le SP démontre sa supériorité. La réduction des forces de frottement exige des films plus minces. Ces résultats, ainsi que ceux relatifs aux facteurs d'usure, ont été obtenus pour un palier de butée à trois segments lubrifié avec une huile de pétrole sans adjuvant, sous des pressions de contact s'élevant jusqu'à 13,8 MPa et à des vitesses de glissement variant de 0,015 m/s à 15 m/s. Pour tous les matériaux, le passage de la lubrification par film mince à la lubrification par film épais se produit approximativement à la même épaisseur de film et les coefficients de frottement dynamiques sont égaux.

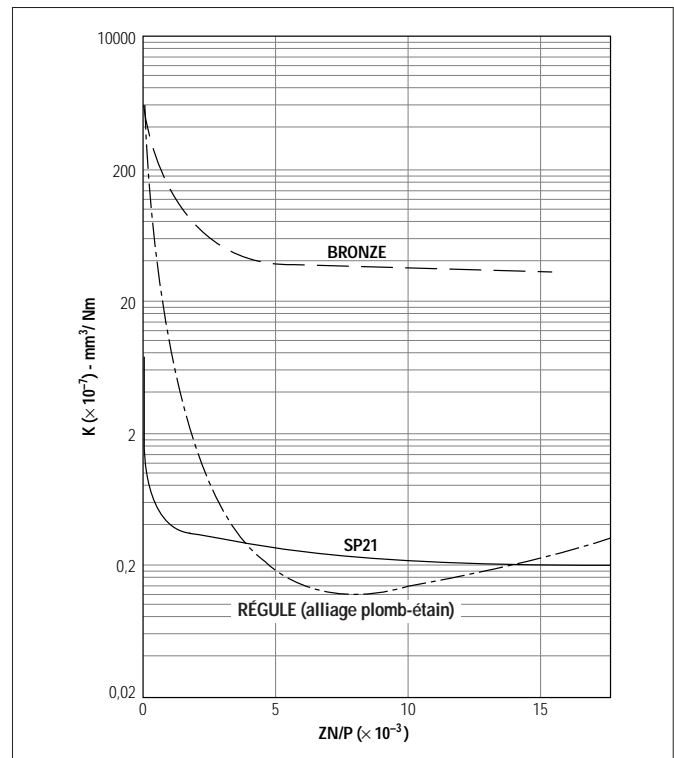


Fig. 43 Résultats des essais d'usure sur surfaces lubrifiées. Facteur d'usure en fonction du rapport ZN/P. Surface de contact (AISI 1080,  $HR_c = 55$ ,  $Ra = 0,4$ ). Essai sur palier de butée à segments. Huile «Sunvis» 31

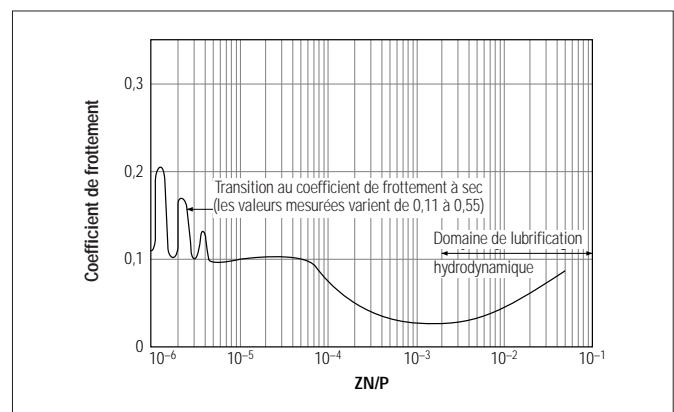


Fig. 44 Résultats des essais de frottement sur surfaces lubrifiées. SP21 sur acier (AISI 1080,  $HR_c = 55$ ,  $Ra = 0,4$ ). Essai sur palier de butée à segments. Huile «Sunvis» 31

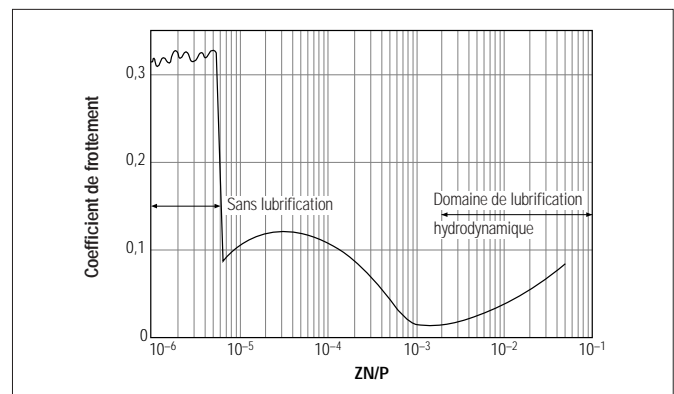


Fig. 45 Résultats des essais de frottement sur surfaces lubrifiées. Bronze sur acier (AISI 1080,  $HR_c = 23$ ,  $Ra = 0,4$ ). Essai sur palier de butée à segments. Huile «Sunvis» 31

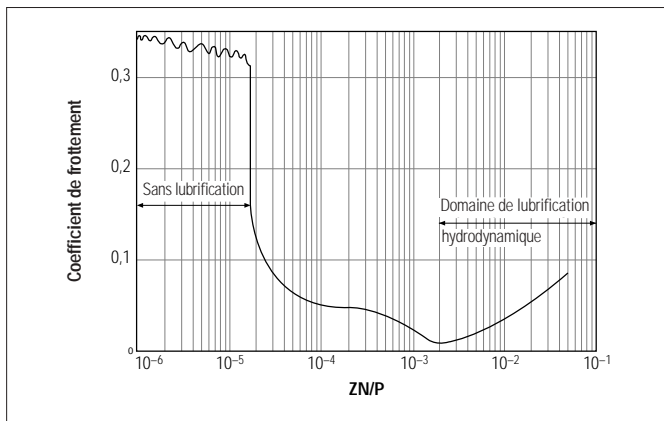


Fig. 46 Résultats des essais de frottement sur surfaces lubrifiées. Régule (alliage plomb-étain) sur acier (AISI 1080,  $HR_c = 23$ ,  $Ra = 0,4$ ). Essai sur palier de butée à segments. Huile «Sunvis» 31

### Interruption de la lubrification

S'il y a un risque d'interruption de la lubrification dans l'un de vos systèmes, il est essentiel de considérer la tenue du palier à sec. Ni le bronze, ni l'alliage plomb-étain ne peuvent fonctionner sans lubrification. En revanche, les pièces VESPEL® en sont capables sans détérioration superficielle, ni défaillance tant que la température limite n'est pas dépassée. Donc, si la lubrification est interrompue, les caractéristiques de frottement et d'usure passent simplement du régime de lubrification limite au régime de fonctionnement à sec. En l'occurrence, la figure 47 montre clairement la supériorité du polyimide. Dès l'instant où l'on ne bénéficie plus des avantages de la lubrification, les forces de frottement augmentent rapidement dans les trois cas. Toutefois, les deux matériaux classiques ne résistent pas, alors que le palier VESPEL® continue de fonctionner sans incident.

Le fonctionnement du palier de butée en SP1 dans l'huile de transmission de type A et l'huile au silicone F-50 est tout à fait satisfaisant. Mais des films minces de certains liquides, l'eau en particulier, n'assurent pas une lubrification convenable. Pour être efficace, le liquide doit mouiller les surfaces de glissement. Par exemple, un film d'eau suffisamment

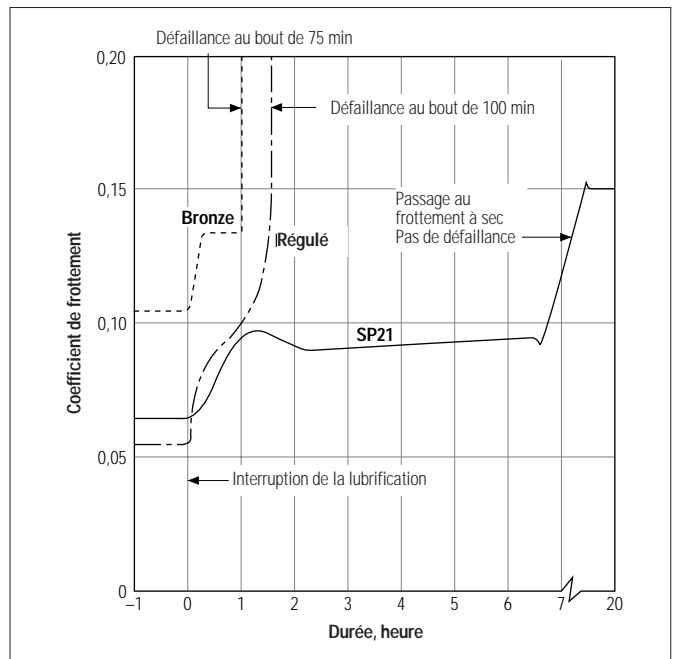


Fig. 47 Essai d'interruption de la lubrification sur un palier de butée à segments. Surface de contact: AISI 1080. Etat de surface:  $HR_c = 55$ ,  $Ra = 0,4$ .  $P = 3,5$  MPa –  $V = 0,1$  m/s. Huile «Sunvis» 31. Rapport  $ZN/P \approx 1,4 \times 10^{-4}$  à  $T = 0$

épais pour séparer les surfaces augmente en fait la vitesse d'usure des pièces en polyimide. Ce phénomène n'a rien d'exceptionnel et il se produit avec d'autres matières plastiques. La solution consiste généralement à ajouter un agent de surface afin de réduire la tension superficielle du liquide.

### Effet de broitage (stick-slip)

Cette expression désigne un mouvement saccadé au démarrage lors du passage de l'adhérence au glissement. Il se manifeste surtout aux vitesses extrêmement faibles et aux taux de glissement accrus. Il est fréquemment imputable à un lissage de la surface de la pièce métallique.

Pour pallier cet effet, on peut diminuer la charge sur la surface, utiliser une surface métallique plus dure ou la tremper, ou encore recourir à la lubrification.



# Segments d'étanchéité

## Intérêt des polyimides

Pour les applications aux températures élevées requérant un maximum de souplesse et de conformabilité, les polyimides dopent les performances des segments d'étanchéité. En effet, ils fonctionnent en continu depuis les températures cryogéniques jusqu'à 300°C, avec des pointes à 500°C, et supportent des charges à des températures hors de la portée de la plupart des autres plastiques. Ils sont beaucoup plus conformables que les métaux, tout en résistant à la déformation permanente en raison de leur résilience.

Les polyimides offrent les meilleures caractéristiques structurales de la fonte (matériau couramment utilisé pour les segments d'étanchéité) et des plastiques techniques, notamment les propriétés d'usure modérée et de faible coefficient de frottement, combinées à une stabilité supérieure à celle des autres plastiques. Là où les polyimides diffèrent radicalement des autres matériaux d'étanchéité, c'est dans leur tenue en milieu non lubrifié, notamment dans les applications d'étanchéité aux gaz. Naturellement auto-lubrifiants, ils présentent une résistance à l'usure exceptionnelle dans les milieux non lubrifiés, à des limites de pression-vitesse à sec pouvant atteindre 12 MPa · m/s.

Les polyimides résistent à la plupart des fluides industriels, solvants, hydrocarbures et lubrifiants synthétiques (fluides hydrauliques et liquides de transmission), aux gaz inertes (azote et argon, par exemple) et à certains carburants. En conséquence, les segments d'étanchéité en polyimide conviennent bien à toutes les applications liées aux transmissions, aux systèmes pneumatiques et hydrauliques, aux véhicules tout terrain, à l'équipement militaire et aux clapets.

L'emploi de pièces VESPEL® dans votre application peut se traduire par une réduction des coûts de fabrication et de garantie, ainsi que par la diminution de la durée d'indisponibilité des machines.

La présente partie a pour objectif de vous aider à utiliser les segments d'étanchéité VESPEL® de la manière la plus économique et efficace. Elle comprend :

- des informations sur les paramètres importants pour la conception des segments d'étanchéité;
- des méthodes de conception des segments d'étanchéité VESPEL®;
- des suggestions pour tirer le meilleur parti du VESPEL®;
- les tolérances recommandées pour les segments d'étanchéité VESPEL®.

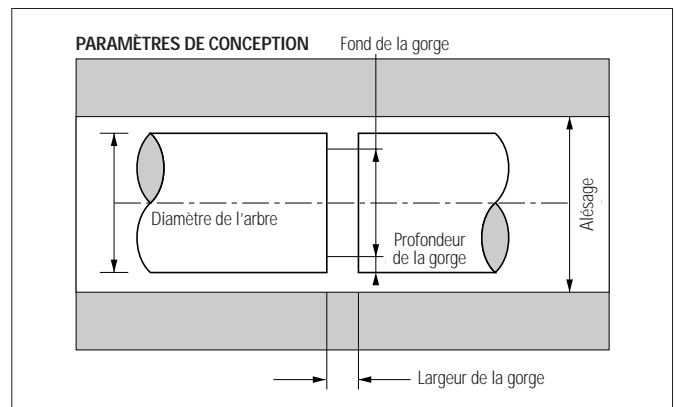
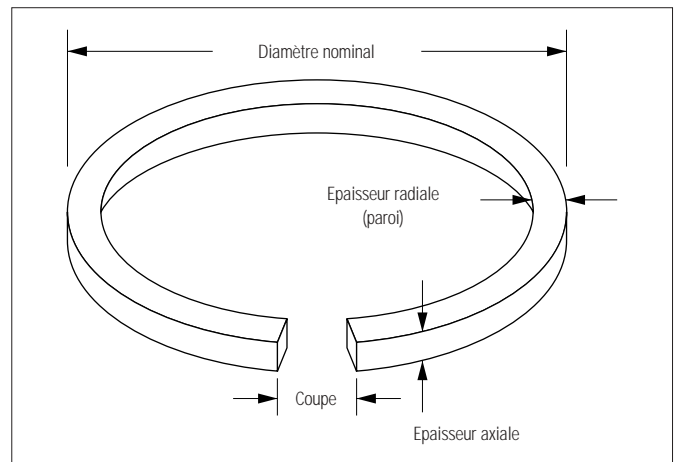
Des informations plus détaillées sur les segments VESPEL® sont données dans la brochure «VESPEL® pour l'automobile» (référence H-11198) et dans la publication SAE 980734 "Improving Automatic Transmission Quality with High Performance Polyimide Rotary Seal Rings".

## Glossaire des paramètres de conception

Certains paramètres géométriques sont communs à toutes les applications de segments d'étanchéité, comme le montrent les deux schémas ci-après.

- **Alésage**: diamètre intérieur de l'espace cylindrique dans lequel le segment est contraint de se déplacer.

- **Diamètre nominal**: diamètre extérieur du segment d'étanchéité, en général égal à l'alésage.
- **Diamètre de contrôle**: diamètre de l'instrument de mesure, généralement ~0,2 mm au-dessus du diamètre nominal.
- **Épaisseur radiale**: différence entre les diamètres extérieur et intérieur du segment d'étanchéité, dite parfois «épaisseur de paroi».
- **Épaisseur axiale**: épaisseur du segment d'étanchéité de bas en haut (hauteur du segment).
- **Coupe**: distance séparant les extrémités ouvertes du segment d'étanchéité lorsqu'il est contraint au diamètre de contrôle.
- **Coupe nominale**: distance séparant les extrémités ouvertes du segment d'étanchéité lorsqu'il est contraint au diamètre nominal.
- **Fond de la gorge**: diamètre de la gorge faisant face à la surface intérieure du segment d'étanchéité.
- **Largeur de la gorge**: dimension axiale de la gorge du segment d'étanchéité.



## Conception standard de segments à coupe droite réalisés par formage direct

Si, dans votre application, vous employez déjà des segments d'étanchéité en métal ou en tout autre plastique technique, il vous faut tenir compte de plusieurs facteurs pour les spécifications de nouveaux segments en VESPEL®. Les indications suivantes mettent en rapport les dimensions du système existant avec celles du segment de remplacement. Toutes les dimensions sont indiquées en millimètres.

## 1. Diamètre nominal

Le diamètre extérieur du segment en position doit être égal au diamètre de l'alésage.

## 2. (Épaisseur axiale)<sub>max</sub> = (largeur de LA GORGE)<sub>min</sub> - 0,1 mm

Prévoyez un jeu latéral total de 0,1 mm pour le segment d'étanchéité dans la gorge à température maximale.

## 3. (ÉPAISSEUR RADIALE)<sub>max</sub> = 0,5 [(ALÉSAGE)<sub>min</sub> - (DIAMÈTRE DU FOND DE LA GORGE)<sub>max</sub>] - 0,1 mm

Prévoyez un jeu radial total de 0,1 mm entre l'alésage et la gorge à température maximale.

## 4. (COUPE)<sub>min</sub> = $\pi \times (\text{DIAMÈTRE DE CONTRÔLE}) \times (T_{\text{max}} - 20) (\alpha_{\text{SP}} - \alpha_{\text{B}})$

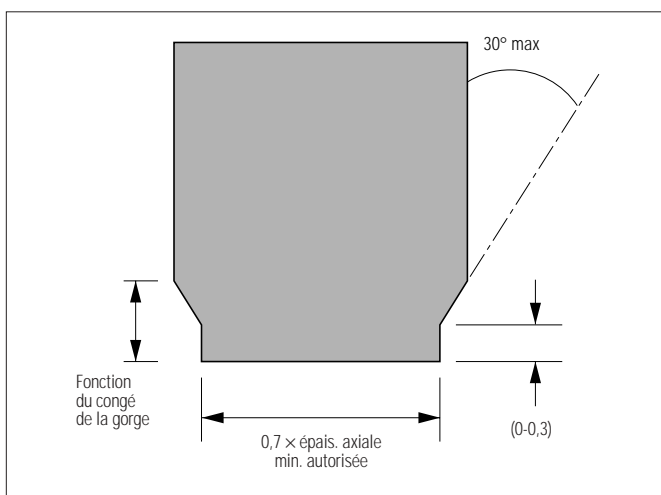
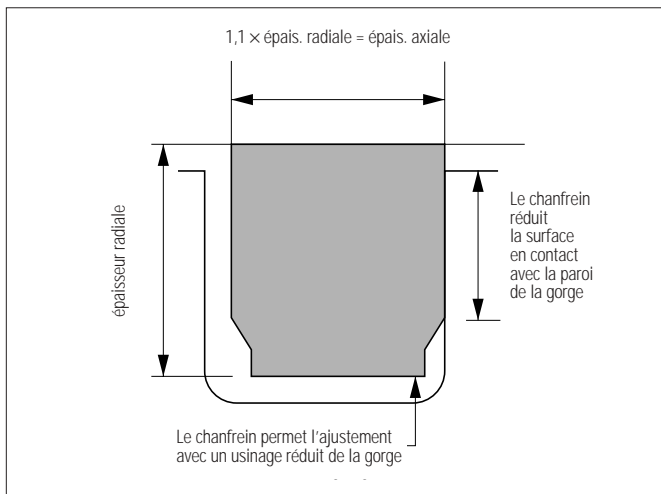
Où:

T = température, °C.

$\alpha_{\text{B}}$  = coefficient de dilatation thermique de la matière de l'alésage, soit  $10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ .

$\alpha_{\text{SP}}$  = coefficient de dilatation thermique de la pièce VESPEL®, soit  $10^{-6} 1/^\circ\text{C}$  (voir tableau 8).

Cette formule permet de calculer la coupe minimale requise compte tenu de la dilatation thermique du segment à la température de service. Le segment se ferme exactement à la température calculée.



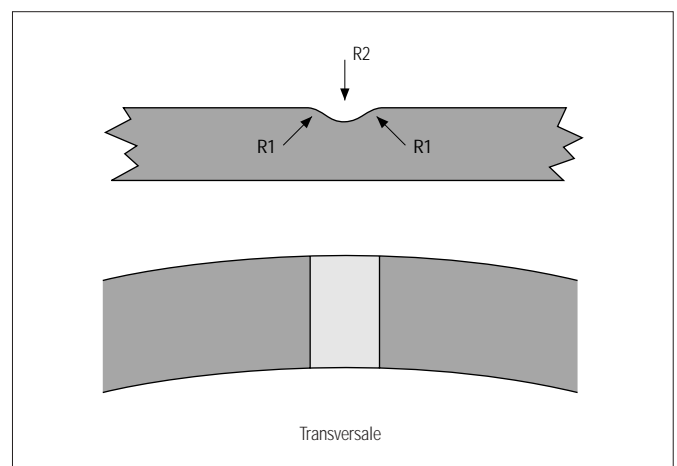
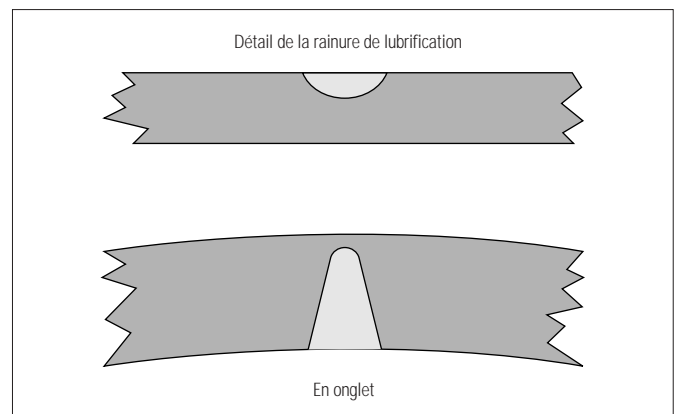
## 5. (ÉPAISSEUR AXIALE)

$$\geq 1,1 (\text{ÉPAISSEUR RADIALE})$$

Le diamètre intérieur des segments d'étanchéité VESPEL® peut être chanfreiné pour réduire le contact entre les faces du segment et de la gorge, si l'ensemble présente une géométrie telle que l'épaisseur axiale est inférieure à 1,1 fois l'épaisseur radiale. L'épaisseur radiale est réduite de la longueur du chanfrein, avec pour résultat une pression mieux équilibrée pour le maintien du segment contre l'alésage. Autre avantage du chanfrein: il autorise le jeu avec tout congé au fond de la gorge, réalisé par usinage de cette dernière. L'angle du chanfrein ne doit pas excéder 30° et l'épaulement sous le chanfrein doit être de 0 à 0,3 mm. L'épaisseur au niveau de l'épaulement (soit la partie la plus mince du segment) ne doit pas excéder 70% de l'épaisseur axiale.

## Autres remarques relatives à la conception

- **Etat de surface de la gorge:** l'état de surface du métal est important en raison de l'action abrasive qui s'exerce entre les matériaux en contact. Les pièces VESPEL® donnent d'excellents résultats, en particulier avec lubrification. Nous recommandons une surface lisse d'une rugosité (Ra) de 0,4  $\mu\text{m}$ . Le matériau de contact de la gorge du segment doit être aussi dur que possible. Toutefois, si l'on utilise de la fonte, l'état de surface est moins crucial. En effet, des essais réels montrent que les surfaces de contact en fonte dont l'état est de 2  $\mu\text{m}$  (Ra) ont une aussi bonne tenue à l'usure que celles rectifiées à 0,8  $\mu\text{m}$ .



- **Mesure de la coupe:** la plupart des plastiques absorbent une certaine quantité d'humidité lorsqu'ils sont exposés à l'air. La teneur en humidité ayant une incidence sur les dimensions du segment, les coupes sont mesurées uniquement après séchage du segment pendant 3 heures à 150°C. Cela simule les conditions réelles d'utilisation du segment et garantit l'élimination de toute l'humidité. On ne peut mesurer les segments VESPEL® avec exactitude qu'en les plaçant dans un calibre et ce, en les ajustant au diamètre extérieur de ce dernier. Il est nécessaire de recourir à des méthodes optiques.
- **Rainures de lubrification:** ces rainures qui conduisent le lubrifiant à la surface du segment améliorent la tenue à l'usure de ce dernier. Les segments d'étanchéité VESPEL® peuvent être dotés en option de rainures de lubrification, dont il existe plusieurs types. Les deux conceptions ci-après ont été testées dans une vaste gamme d'applications et ont fait leurs preuves dans de nombreux cas.

## Tolérances de conception

Les polyimides permettent une toute autre approche en matière de tolérances pour la conception des segments d'étanchéité. Leur supériorité sur les métaux en termes de conformabilité et de frottement permet au concepteur de créer des segments avec des tolérances moins serrées. De fait, les segments en polyimide montrent une aptitude à l'étanchéité supérieure à celle des segments métal sur métal usinés en respectant des tolérances beaucoup plus étroites.

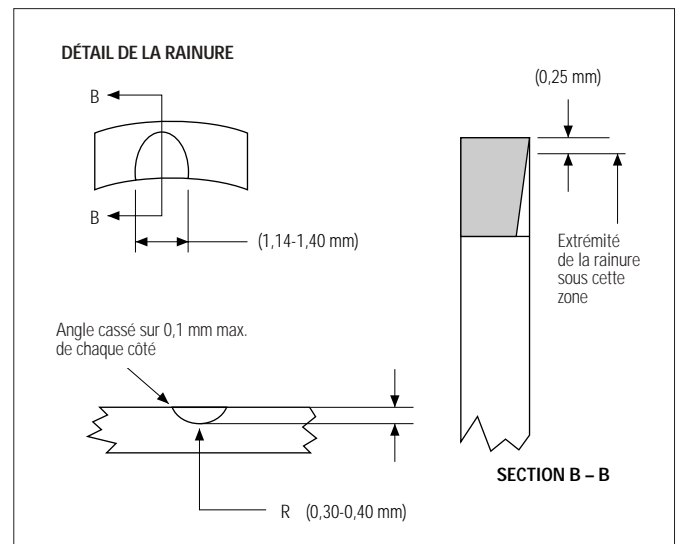
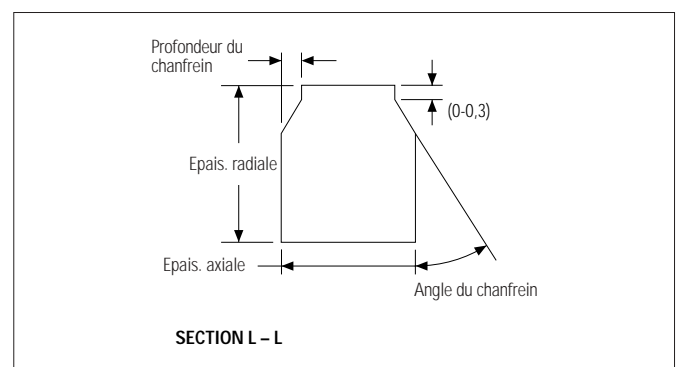
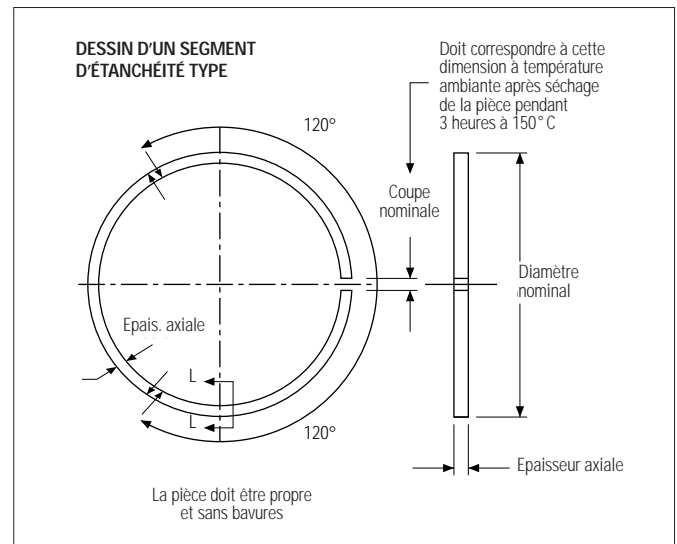
Il en résulte une réduction des opérations onéreuses de finition des surfaces et d'usinage et, par conséquent, des économies non négligeables. Le tableau ci-après donne des indications de tolérances pour les segments d'étanchéité standard en polyimide.

L'assemblage bénéficie également de l'excellente conformabilité de ces matériaux. Les polyimides étant plus stables que les autres plastiques techniques et plus souples que les métaux, ils résistent mieux et sont souvent plus faciles à assembler.

Les segments en fonte sont durs mais fragiles et se cassent souvent pendant l'assemblage. Les segments fabriqués avec d'autres plastiques techniques, moins durs que les polyimides, subissent souvent des cisaillements et des coupures qui ne sont pas détectées.

## Tolérances (dimensions en millimètres)

Diamètre de contrôle	Coupe	Paroi axiale	Paroi radiale
<38	±0,10	±0,10	±0,025
38 à 64	±0,125	±0,125	±0,025
64 à 89	±0,15	±0,15	±0,040
89 à 127	±0,175	±0,175	±0,040
127 à 178	±0,23	±0,23	±0,050



## Grades de VESPEL® pour les segments d'étanchéité

**SP21** Le matériau standard pour les segments d'étanchéité, car il présente la meilleure combinaison de résistance mécanique et de tenue à l'usure.

**SP22** Il possède à peu près les mêmes caractéristiques d'usure, mais est plus fragile. Son coefficient de dilatation thermique linéaire est néanmoins inférieur à celui du SP21.

**SP211** Ses propriétés sont similaires à celles du SP21 avec toutefois un coefficient de frottement inférieur jusqu'à 150°C.

En raison de l'impact du procédé de fabrication sur le coefficient de dilatation thermique (voir tableau 8), les essais effectués par le client doivent l'être sur des pièces usinées dans le matériau (formage direct ou semi-produit) qui sera utilisé ultérieurement pour l'application finale.

### Surface de contact en aluminium

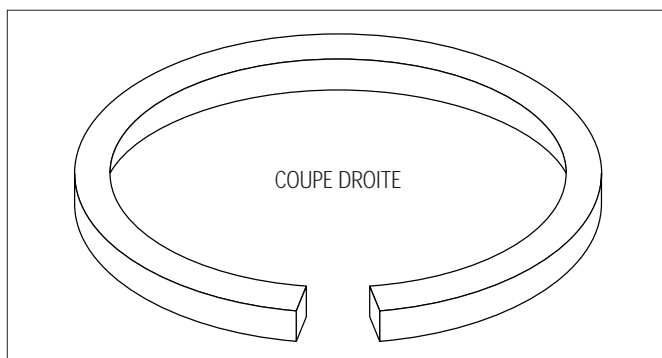
A l'encontre de la plupart des autres segments, les segments en VESPEL® peuvent fonctionner en contact avec la paroi latérale de la gorge ou avec l'alésage. Lorsque l'un des matériaux est de l'aluminium et l'autre de l'acier ou de la fonte, il est préférable de concevoir le segment de sorte que le déplacement relatif s'effectue entre le VESPEL® et l'acier ou la fonte.

### Segments d'étanchéité de conception spécifique

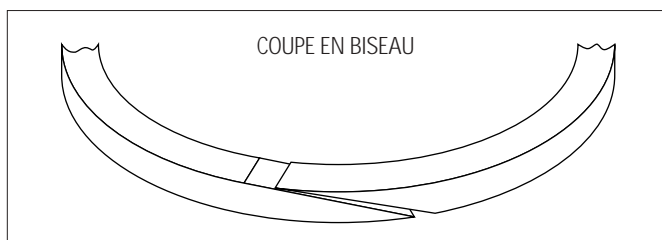
De plus en plus d'applications, en particulier dans le domaine des transmissions automatiques automobiles, exigent des segments dotés de caractéristiques spécifiques, qui ont conduit à diverses règles de conception adaptées aux différents besoins.

### Géométrie de la coupe

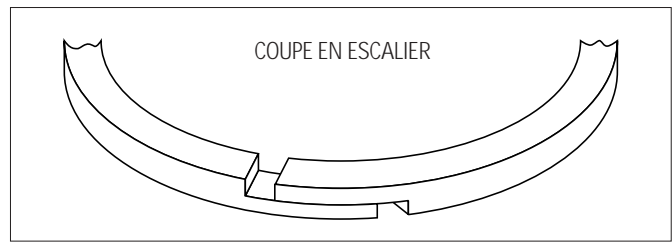
- Coupe droite
- Fabrication possible par formage direct
  - La coupe se ferme sous l'effet de la température et supporte la compression sans déformation permanente
  - Solution économique et efficace



- Coupe en biseau
- Fabrication impossible par formage direct
  - Doit être usiné
  - L'effet de la température sur la fermeture de la coupe est beaucoup plus faible que pour la coupe droite



- Coupe en escalier
- Peut être formé directement en fonction de la géométrie
  - Se comporte en principe comme le segment à coupe droite avec un jeu légèrement réduit



### Taux de fuite très faible avec des segments à coupe droite comprimés

Matériau tenace, le VESPEL® supporte une certaine compression sans déformation permanente. En conséquence, il est possible de concevoir un segment d'étanchéité à coupe droite fermé («0») à partir de 20°C jusqu'à la température maximale en service. La dilatation thermique du segment en VESPEL® est absorbée par le taux de déformation élastique inhérent au matériau. Un minimum de pression d'huile est requis pour appliquer le segment sur la surface d'étanchéité afin d'éviter qu'il se voile dans la gorge sous l'effet de la compression thermique. Plus les diamètres sont petits, plus la pression d'huile doit être importante. En conséquence, il est très important de connaître la pression minimale du système d'étanchéité.

Pour ces segments qui présentent un taux de fuite constant très faible, l'épaisseur axiale doit être aussi importante que le permettent la gorge et les indications de conception. Il est recommandé que le déplacement relatif du segment s'effectue contre la gorge de l'arbre, autrement dit que le segment reste quasi immobile par rapport au logement.

### Segments d'étanchéité à coupe en biseau

Ces segments, dotés d'un angle de coupe de 20° en général, sont très répandus. Il est impossible de les produire en une seule étape: la coupe doit être usinée après le moulage du segment.

Le taux de fuite des segments à coupe en biseau est légèrement plus élevé que celui des segments à coupe droite comprimés. En revanche, les segments à coupe en biseau sont moins sensibles à la pression minimale de la transmission.

### Assemblage

Il est possible de produire des segments VESPEL® avec une mémoire qui les force dans le fond de la gorge. Ces segments sont livrés fermés ou avec un chevauchement au niveau de la coupe. Une fois assemblés sur l'arbre, ils ont tendance à rester à l'intérieur du fond de la gorge. Cette caractéristique facilite l'assemblage dans le logement sans utiliser de graisse, et le rend plus fiable.

Il est recommandé de conserver les segments d'étanchéité emballés jusqu'à l'installation finale et de guider les segments dans leur gorge à l'aide d'outils coniques. Pour plus de détails, contactez votre ingénieur commercial VESPEL®.

Les segments VESPEL® ont un module d'élasticité en flexion supérieur à celui des segments en PTFE, par exemple et peuvent donc être utilisés dans les chaînes d'assemblage automatiques.



L'épaisseur de paroi maximale pour les segments comprimés doit être de :

$$0,5 \times (\text{DIAM. ARBRE}_{\min} - \text{DIAM}_{\max} \text{ DU FOND DE LA GORGE}) - 0,05 \text{ mm}$$

Pour éviter la rupture du segment pendant l'assemblage de l'arbre dans le logement, il faut que la tolérance de l'épaisseur de paroi soit aussi réduite que possible.

### Sélection

Pour sélectionner le grade approprié, il convient de tenir compte de la différence de dilatation thermique et de vitesse d'usure des produits proposés. Le type et les tolérances des coupes sont spécifiés sur la base des conditions en service, des contraintes en matière de fuite et de la pression minimale de la transmission. Les figures 48 à 51 montrent l'effet du type de coupe du segment d'étanchéité et du grade sur le taux de fuite.

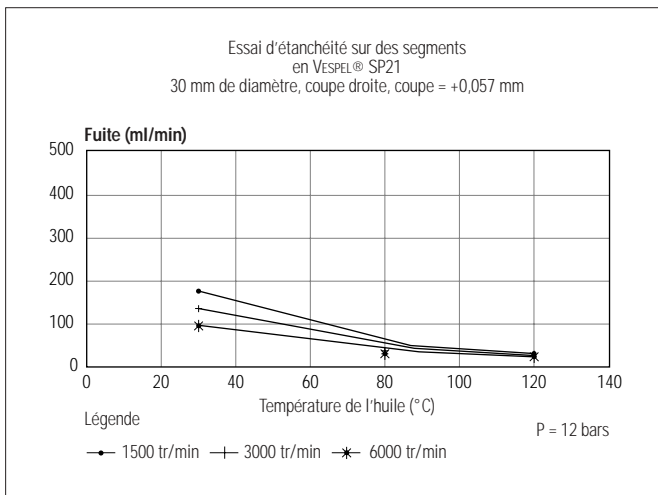


Fig. 48 Segment d'étanchéité en SP21. Coupe droite (positive)

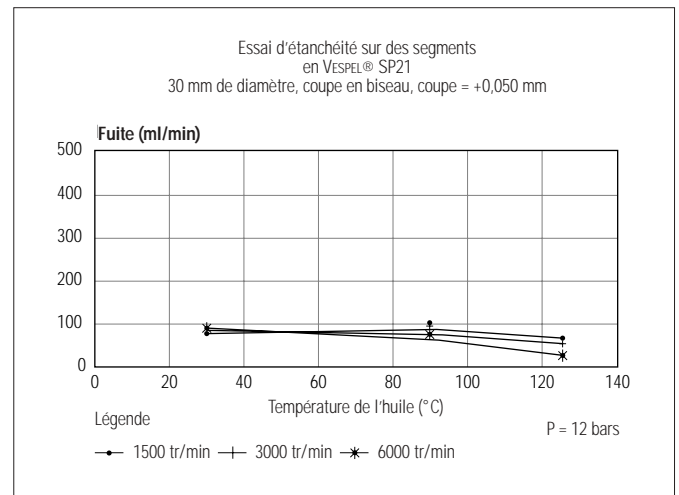


Fig. 50 Segment d'étanchéité en SP21. Coupe en biseau

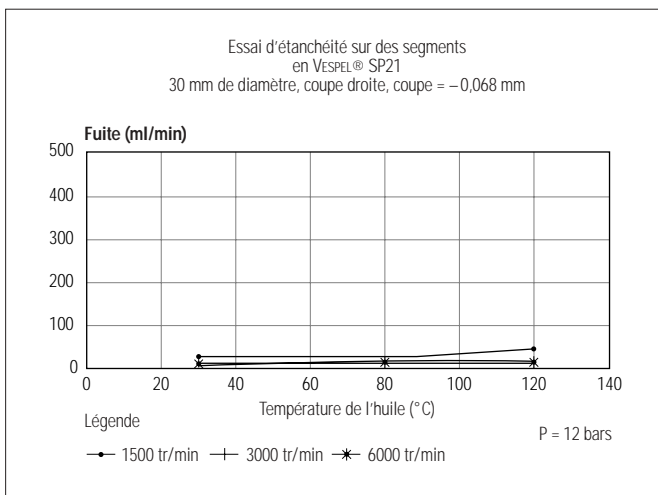


Fig. 49 Segment d'étanchéité en SP21. Coupe droite comprimée (négative)

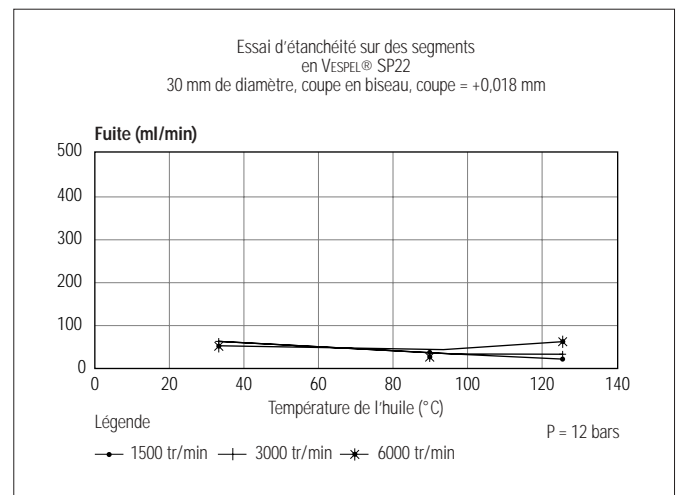


Fig. 51 Segment d'étanchéité en SP22. Coupe en biseau

# Tableaux et figures

## Tableaux

	Page
1 – Récapitulatif des propriétés caractéristiques des résines polyimides SP . . . . .	7
2 – Récapitulatif des propriétés caractéristiques des résines polyimides SP . . . . .	8
3 – Propriétés caractéristiques préliminaires des nouvelles résines polyimides SP . . . . .	9
4 – Propriétés caractéristiques des pièces VESPEL® ST formées directement . . . . .	10
5 – Impact des produits chimiques . . . . .	21
6 – Limites PV . . . . .	34
7 – Coefficients de frottement types – essai sur des paliers de butée non lubrifiés . . . . .	36
8 – Coefficient de dilatation thermique . . . . .	37

## Figures

1 – Formule chimique du VESPEL® SP . . . . .	3
2 – Semi-produits polyimide SP: influence de la température sur la résistance à la traction . . . . .	11
3 – SP et ST formés directement: influence de la température sur la résistance à la traction . . . . .	11
4 – Semi-produits polyimide SP: influence de la température sur le module d'élasticité . . . . .	11
5 – SP et ST formés directement: influence de la température sur le module d'élasticité . . . . .	11
6 – Exposition à l'air du polyimide SP aux températures élevées . . . . .	12
7 – Influence de la température sur l'allongement à la rupture du SP21 et du ST2010 . . . . .	12
8 – Influence de la température sur la résistance à la compression au point de rupture du SP21 et du ST2010 . . . . .	13
9 – Influence de la température sur la résistance à la traction au point de rupture du SP21 et du ST2010 . . . . .	13
10 – Semi-produits polyimide SP: contrainte-déformation en traction à 23°C . . . . .	13
11 – Semi-produits polyimide SP: contrainte-déformation en traction à 260°C . . . . .	13
12 – SP formé directement: contrainte-déformation en traction à 23°C . . . . .	13
13 – SP formé directement: contrainte-déformation en traction à 260°C . . . . .	14
14 – Semi-produits polyimide SP: contrainte-déformation en compression à 23°C . . . . .	14
15 – Semi-produits polyimide SP: contrainte-déformation type en compression à 300°C . . . . .	14
16 – SP et ST formés directement: contrainte-déformation en compression à 23°C . . . . .	14
17 – Semi-produit polyimide SP1: déformation totale dans le temps sous charge . . . . .	15
18 – Semi-produit polyimide SP21: déformation totale dans le temps sous charge . . . . .	15
19 – Semi-produit polyimide SP22: déformation totale dans le temps sous charge . . . . .	15
20 – Semi-produit polyimide SP1: module apparent dans le temps sous charge . . . . .	15

21 – Semi-produit polyimide SP21: module apparent dans le temps sous charge . . . . .	15
22 – Semi-produit polyimide SP22: module apparent dans le temps sous charge . . . . .	15
23 – Semi-produits polyimide SP1 et SP21: variation dimensionnelle à 23°C et 50% HR . . . . .	16
24 – SP1 formé directement: variation dimensionnelle à 23°C, 50 et 100% HR . . . . .	16
25 – SP21 formé directement: variation dimensionnelle à 23°C, 50 et 100% HR . . . . .	16
26 – Semi-produits polyimide SP1 et SP21: variation dimensionnelle à 23°C en fonction de HR . . . . .	17
27 – SP formé directement: variation dimensionnelle à 23°C en fonction de HR . . . . .	17
28 – Semi-produits polyimide SP: dilatation thermique linéaire . . . . .	17
29 – SP et ST formés directement: dilatation thermique linéaire . . . . .	17
30 – Semi-produits polyimide SP: résistance à la fatigue en fonction de la température . . . . .	18
31 – Influence de la température sur la constante diélectrique (SP1) . . . . .	18
32 – Influence de la température sur le facteur de pertes (SP1) . . . . .	18
33 – Semi-produit polyimide SP1: influence de la température sur la résistivité transversale . . . . .	19
34 – Semi-produit polyimide SP1: influence de la température sur la résistivité superficielle . . . . .	19
35 – Semi-produit polyimide SP1: influence de la température sur la rigidité diélectrique . . . . .	19
36 – Semi-produit polyimide SP1: influence de l'épaisseur sur la rigidité diélectrique . . . . .	19
37 – SP21: vitesse d'usure en fonction du PV . . . . .	35
38 – SP21: limite PV . . . . .	35
39 – Facteur d'usure du SP21 et du SP211 en service sans lubrification . . . . .	36
40 – Coefficient de frottement du SP21 et du SP211 en service sans lubrification . . . . .	36
41 – Influence de la dureté de la surface de contact sur l'usure . . . . .	37
42 – Influence de l'état de la surface de contact sur l'usure . . . . .	37
43 – Résultats des essais d'usure sur surfaces lubrifiées. Facteur d'usure en fonction du rapport ZN/P . . . . .	40
44 – Résultats des essais de frottement sur surfaces lubrifiées. SP21 sur acier . . . . .	40
45 – Résultats des essais de frottement sur surfaces lubrifiées. Bronze sur acier . . . . .	40
46 – Résultats des essais de frottement sur surfaces lubrifiées. Régule sur acier . . . . .	41
47 – Essai d'interruption de la lubrification . . . . .	41
48 – Essai d'étanchéité sur segment SP21. Coupe droite (positive) . . . . .	47
49 – Essai d'étanchéité sur segment SP21. Coupe droite (négative) . . . . .	47
50 – Essai d'étanchéité sur segment SP21. Coupe en biseau . . . . .	47
51 – Essai d'étanchéité sur segment SP22. Coupe en biseau . . . . .	47

# Annexe A

## Dimensions standard des semi-produits

### Rondins

Diamètre minimal mm	Longueur minimale mm
6,3	965
9,5	965
11,1	965
12,7	965
15,8	965
19,0	965
25,4	965
31,7	965
38,1	965
50,8	965
63,5	965
82,5	685

### Plaques

Epaisseur minimale mm	Surface
50,8	} 254 × 254 mm <sup>2</sup> 254 × 127 mm <sup>2</sup> 127 × 127 mm <sup>2</sup>
38,1	
25,4	
12,7	
6,3	
4,8*	
3,2*	
1,6*	

\* Les plaques minces sont disponibles uniquement en SP1 et SP21 en 254 × 254 mm<sup>2</sup>.

### Barres

Dimensions minimales de la section Largeur × épaisseur mm	Longueur minimale
101 × 50,8 mm	965 mm / 317,5 mm

### Bagues et disques

Les bagues et disques sont disponibles dans une gamme de diamètres allant de 15,8 mm à 63,5 mm et d'épaisseurs de 3,1 mm à 6,3 mm.

### Billes uniquement en SP1

Diamètre en mm
3,2
6,3
9,5
12,7
15,8

La tolérance sur les diamètres des billes est de  $\pm 0,051$  mm.

### Tubes

Diamètre extérieur minimal mm	Diamètre intérieur maximal mm	Longueur minimale mm
180	142	838
170	142	838
162	142	838
170	119	838
149	119	838
142	119	838
165	109	838
154	109	838
144	109	838
137	109	838
121	109	838
137	86,3	838
124	86,3	838
109	86,3	838
94	86,3	838
129	66,0	838
119	66,0	838
101	66,0	838
86,3	66,0	838
124	48,2	838
111	48,2	838
94,0	48,2	838
78,7	48,2	838
43,1	35,5	685
40,6	27,9	685

La plupart des diamètres extérieurs indiqués sont des valeurs minimales. Les diamètres intérieurs réels sont légèrement inférieurs aux valeurs données.

Dimensions nominales au- (mm) dessus jusqu'à		Ecart dimensionnel minimal et maximal en $\mu$ (0,001 mm)																																	
		ARBRES																																	
		g5	h5	j5	k5	m5	n5	g6	h6	j6	k6	m6	n6	r6	f7	h7	j7	k7	m7	n7	b8	e8	f8	h8	d9	e9	f9	h9	d10	a11	b11	c11	d11	h11	
-	1	-2	0	+2	+4	+6	+8	-2	0	+4	+6	+8	+10	+10	+16	-6	0	+6	+10	-	+14	-	-14	-6	0	-20	-14	-6	0	-20	-	-60	-20	0	
		-6	-4	-2	0	+2	+4	-8	-6	-2	0	0	+2	+4	+10	+10	-16	-10	-4	0	+4	-	-28	-20	-14	-20	-45	-39	-31	-25	-60	-	-120	-80	-60
1	3	-2	0	+2	+4	+6	+8	-2	0	+4	+6	+8	+10	+10	+16	-6	0	+6	+10	-	+14	-140	-6	0	-20	-14	-6	0	-20	-270	-140	-60	-20	0	
		-6	-4	-2	0	+2	+4	-8	-6	-2	0	+2	+4	+10	+10	+16	-10	-10	-4	0	+4	-154	-28	-20	-14	-45	-39	-31	-25	-330	-200	-120	-80	-60	
3	6	-4	0	+3	+6	+9	+13	-4	0	+6	+9	+12	+16	+23	-10	0	+8	+13	+16	+16	+20	-140	-10	0	-30	-20	-10	0	-30	-270	-140	-70	-30	0	
		-9	-5	-2	+1	+4	+8	-12	-8	-2	0	+4	+8	+15	+22	-12	-4	+1	+4	+4	+8	-158	-38	-28	-18	-60	-50	-40	-30	-345	-215	-145	-105	-75	
6	10	-5	0	+4	+7	+12	+16	-5	0	+7	+10	+15	+19	+28	-13	0	+10	+16	+21	+25	+25	-150	-13	0	-40	-25	-13	0	-40	-280	-150	-80	-40	0	
		-11	-6	-2	+1	+6	+10	-14	-9	-2	0	+6	+10	+14	+29	-28	-15	-5	+1	+6	+10	-172	-47	-35	-22	-76	-61	-49	-36	-98	-240	-170	-130	-90	
10	14	-6	0	+5	+9	+15	+20	-6	0	+8	+12	+18	+23	+34	-16	0	+12	+19	+25	+30	-150	-32	0	0	-50	-32	-16	0	-50	-290	-150	-95	-50	0	
		-14	-8	-3	+1	+7	+12	-17	-11	-3	+1	+7	+12	+23	+23	-34	-18	-6	+1	+7	+12	-177	-39	-43	-27	-93	-75	-59	-43	-400	-260	-205	-160	-110	
18	24	-7	0	+5	+11	+17	+24	-7	0	+9	+15	+21	+28	+41	-20	0	+13	+23	+29	+36	-160	-40	0	0	-65	-40	-20	0	-65	-300	-160	-110	-65	0	
		-16	-9	-4	+2	+8	+15	-20	-13	-4	+2	+8	+15	+28	+28	-41	-21	-8	+2	+8	+15	-193	-73	-53	-33	-117	-92	-72	-52	-430	-290	-240	-195	-130	
30	40	-9	0	+6	+13	+20	+28	-9	0	+11	+18	+25	+33	+50	-25	0	+15	+27	+34	+42	-170	-50	0	0	-80	-50	-25	0	-80	-310	-170	-120	-80	0	
		-20	-11	-5	+2	+9	+17	-25	-16	-5	+2	+9	+17	+34	+34	-50	-25	-10	+2	+9	+17	-180	-89	-64	-39	-142	-112	-87	-62	-180	-320	-180	-130	-80	0
50	65	-10	0	+6	+15	+24	+33	-10	0	+12	+21	+30	+39	+60	-30	0	+18	+32	+41	+50	-190	-60	0	0	-100	-60	-30	0	-100	-340	-190	-140	-100	0	
		-23	-13	-7	+2	+11	+20	-29	-19	-7	+2	+11	+20	+43	+62	-60	-30	-12	+2	+11	+20	-200	-106	-76	-46	-174	-134	-104	-74	-220	-360	-200	-150	-90	0
80	100	-12	0	+6	+18	+28	+38	-12	0	+13	+25	+35	+45	+73	-36	0	+20	+38	+48	+58	-220	-72	-36	0	0	-120	-72	-36	0	-120	-380	-220	-170	-120	0
		-27	-15	-9	+3	+13	+23	-34	-22	-9	+3	+13	+23	+76	+76	-71	-35	-15	+3	+13	+23	-240	-126	-90	-54	-207	-159	-123	-87	-410	-240	-180	-130	-80	0
120	140	-14	0	+7	+21	+33	+45	-14	0	+14	+28	+40	+52	+88	-43	0	+22	+43	+55	+67	-260	-85	-43	0	0	-145	-85	-43	0	-145	-520	-280	-210	-145	0
		-32	-18	-11	+3	+15	+27	-39	-25	-11	+3	+15	+27	+65	+65	-83	-40	-18	+3	+15	+27	-323	-148	-106	-63	-245	-185	-143	-100	-305	-770	-530	-460	-395	-250
160	180	-15	0	+7	+24	+37	+51	-15	0	+16	+33	+46	+60	+93	-50	0	+25	+50	+63	+77	-340	-100	-50	0	0	-170	-100	-50	0	-170	-740	-380	-260	-170	0
		-35	-20	-13	+4	+17	+31	-44	-29	-13	+4	+17	+31	+80	+80	-96	-46	-21	+4	+17	+31	-452	-172	-122	-72	-285	-215	-165	-115	-355	-1030	-670	-550	-460	-290
200	225	-17	0	+7	+27	+43	+57	-17	0	+16	+36	+52	+66	+106	-56	0	+26	+56	+72	+86	-480	-110	-56	0	0	-190	-110	-56	0	-190	-920	-480	-300	-190	0
		-40	-23	-16	+4	+20	+34	-49	-32	-16	+4	+20	+34	+130	+130	-108	-52	-26	+4	+20	+34	-561	-191	-137	-81	-320	-240	-186	-130	-400	-950	-630	-530	-510	-320
250	280	-18	0	+7	+29	+46	+62	-18	0	+18	+40	+57	+73	+144	-62	0	+29	+61	+78	+94	-600	-125	-62	0	0	-210	-125	-62	0	-210	-1200	-600	-360	-210	0
		-43	-25	-18	+4	+21	+37	-54	-36	-18	+4	+21	+37	+150	+150	-119	-57	-28	+4	+21	+37	-689	-214	-151	-89	-350	-265	-202	-140	-440	-1350	-680	-400	-570	-360
315	355	-20	0	+7	+32	+50	+67	-20	0	+20	+45	+63	+80	+166	-68	0	+31	+68	+86	+103	-760	-135	-68	0	0	-230	-135	-68	0	-230	-1500	-760	-440	-230	0
		-47	-27	-20	+5	+23	+40	-60	-40	-20	+5	+23	+40	+172	+172	-131	-63	-32	+5	+23	+40	-840	-232	-165	-97	-385	-290	-223	-155	-480	-1650	-840	-480	-630	-400
400	450	-20	0	+7	+32	+50	+67	-20	0	+20	+45	+63	+80	+172	-68	0	+31	+68	+86	+103	-937	-135	-68	0	0	-230	-135	-68	0	-230	-1900	-1160	-840	-230	0
		-47	-27	-20	+5	+23	+40	-60	-40	-20	+5	+23	+40	+132	+132	-131	-63	-32	+5	+23	+40	-937	-232	-165	-97	-385	-290	-223	-155	-480	-2050	-1240	-880	-630	-400

**Ecart dimensionnel minimal et maximal en  $\mu$  (0,001 mm)**

**ALÉSAGES**

Dimensions nominates au-dessus (mm)	Ecart dimensionnel minimal et maximal en $\mu$ (0,001 mm)																														
	G6	H6	J6	K6	M6	N6	F7	G7	H7	J7	K7	M7	N7	R7	B8	E8	F8	H8	J8	K8	M8	N8	D9	E9	D10	A11	B11	C11	D11	H11	
1	+8	+6	+2	0	-2	-4	+16	+12	+10	+4	0	-2	-4	-10	-	+28	+20	+14	+6	0	-4	+45	+39	+60	-	-	-	+120	+80	+60	
3	+8	+6	+2	-4	-8	-10	+6	+12	0	-6	-10	-12	-14	-20	-	+14	+6	0	-8	-14	-18	+20	+14	+20	+330	+200	+200	+120	+80	+60	
6	+12	+8	+3	-2	-8	-10	+6	+2	0	-6	-10	-12	-14	-20	+154	+28	+20	+14	+6	0	-4	+45	+39	+60	+330	+200	+200	+120	+80	+60	
10	+14	+9	+5	+2	-1	-5	+22	+16	+12	+6	+3	0	-4	-11	+158	+38	+28	+18	+10	+5	-2	+60	+50	+78	+345	+215	+145	+105	+75	+0	
14	+14	+9	+5	+2	-3	-7	+28	+20	+15	+8	+5	0	-4	-13	+172	+47	+35	+22	+12	+6	+1	+98	+61	+98	+370	+240	+170	+130	+90	+0	
18	+17	+11	+6	+2	-4	-9	+34	+24	+18	+10	+6	0	-5	-16	+177	+59	+43	+27	+15	+8	+2	+93	+75	+120	+400	+260	+205	+160	+110	+0	
24	+20	+13	+8	+2	-4	-11	+41	+28	+21	+12	+6	0	-7	-20	+193	+73	+53	+33	+20	+10	+4	+117	+92	+149	+430	+290	+240	+195	+130	+0	
30	+25	+16	+10	+3	-4	-12	+50	+34	+25	+14	+7	0	-8	-25	+209	+89	+64	+39	+24	+12	+5	+142	+112	+180	+470	+330	+280	+240	+160	+0	
40	+25	+16	+10	+3	-4	-12	+50	+34	+25	+14	+7	0	-8	-25	+219	+50	+25	0	-15	-27	-34	+80	+50	+80	+480	+340	+290	+240	+80	+0	
50	+29	+19	+13	+4	-5	-14	+60	+40	+30	+18	+9	0	-9	-30	+236	+106	+76	+46	+28	+14	+5	+174	+134	+220	+530	+380	+330	+290	+190	+0	
65	+29	+19	+13	+4	-5	-14	+60	+40	+30	+18	+9	0	-9	-30	+190	+60	+30	0	-18	-32	-41	+100	+60	+100	+550	+390	+340	+100	+0	+0	
80	+34	+22	+16	+4	-6	-18	+71	+47	+35	+22	+10	0	-10	-35	+274	+126	+90	+54	+34	+16	+6	+207	+159	+260	+600	+440	+390	+340	+220	+220	+0
100	+34	+22	+16	+4	-6	-18	+71	+47	+35	+22	+10	0	-10	-35	+220	+72	+36	0	-20	-38	-48	+120	+72	+120	+630	+460	+400	+120	+0	+0	
120	+39	+25	+18	+4	-8	-20	+83	+54	+40	+26	+12	0	-12	-40	+323	+148	+106	+63	+41	+20	+8	+245	+185	+305	+710	+510	+450	+290	+250	+0	
140	+39	+25	+18	+4	-8	-20	+83	+54	+40	+26	+12	0	-12	-40	+260	+85	+43	0	-22	-43	-55	+145	+85	+145	+770	+530	+460	+395	+250	+0	
160	+44	+29	+22	+5	-8	-24	+96	+61	+46	+30	+13	0	-14	-52	+343	+172	+122	+72	+47	+22	+9	+285	+215	+355	+850	+560	+480	+460	+170	+0	
180	+44	+29	+22	+5	-8	-24	+96	+61	+46	+30	+13	0	-14	-52	+373	+100	+50	0	-25	-50	-63	+170	+100	+170	+850	+560	+480	+460	+170	+0	
200	+49	+32	+25	+5	-9	-25	+108	+69	+52	+36	+16	0	-14	-52	+310	+191	+137	+81	+55	+25	+9	+320	+240	+400	+950	+630	+530	+460	+320	+320	+0
225	+49	+32	+25	+5	-9	-25	+108	+69	+52	+36	+16	0	-14	-52	+412	+172	+122	+72	+47	+22	+9	+320	+240	+400	+950	+630	+530	+460	+320	+320	+0
250	+49	+32	+25	+5	-9	-25	+108	+69	+52	+36	+16	0	-14	-52	+340	+191	+137	+81	+55	+25	+9	+320	+240	+400	+1240	+800	+620	+510	+320	+320	+0
280	+54	+36	+29	+7	-10	-26	+119	+75	+57	+39	+17	0	-16	-57	+452	+110	+56	0	-26	-56	-72	+190	+110	+190	+1370	+860	+650	+460	+320	+320	+0
315	+54	+36	+29	+7	-10	-26	+119	+75	+57	+39	+17	0	-16	-57	+380	+125	+62	0	-29	-61	-86	+350	+265	+440	+1560	+960	+720	+570	+360	+360	+0
355	+54	+36	+29	+7	-10	-26	+119	+75	+57	+39	+17	0	-16	-57	+492	+125	+62	0	-29	-61	-86	+350	+265	+440	+1560	+960	+720	+570	+360	+360	+0
400	+60	+40	+33	+8	-10	-27	+131	+83	+63	+43	+18	0	-17	-63	+689	+214	+151	+89	+60	+28	+11	+385	+290	+480	+1900	+1160	+840	+630	+400	+400	+0
450	+60	+40	+33	+8	-10	-27	+131	+83	+63	+43	+18	0	-17	-63	+600	+232	+165	+97	+66	+29	+11	+385	+290	+480	+1500	+1000	+760	+440	+230	+230	+0
500	+60	+40	+33	+8	-10	-27	+131	+83	+63	+43	+18	0	-17	-63	+540	+135	+68	0	-31	-68	-86	+230	+135	+230	+2050	+1240	+880	+230	+230	+0	+0

# Annexe C

## Fiche de sécurité produit

### LES PIÈCES ET SEMI-PRODUITS EN POLYIMIDE VESPEL® FIGURENT TOUS DANS LA LISTE DES SYNONYMES VSP001

#### Produit chimique et identification de la société

##### Identification des matériaux

VESPEL® est une marque déposée de DuPont Corporate, MSDS numéro DU003855.

##### Appellations commerciales et synonymes

VESPEL® SP1, SP3, SP21, SP22, SP211, SP221,

VESPEL® SP1D, SP21D, SP22D, SP211D, SP221D,

VESPEL® ST2000, ST2000D, ST2005, ST2005D, ST2010, ST2010D, ST2030, ST2030D

##### Identification de la société

###### Producteur/Distributeur

DuPont  
Polymers  
1007 Market Street  
Wilmington, DE 19898, U.S.A.

###### Numéros de téléphone

Information produit	1-800-441-7515
Urgence transport	1-800-424-9300
Urgence médicale	1-800-441-3637

#### Composition/Information sur les ingrédients

##### Composants

Composants du matériau	N° CAS	%
Poly-N,N'-(p,p'-oxydiphénylène) pyroméllitimide	25038-81-7	50-100
<i>Dans les SP21, 22, 211, 221, et les produits ST uniquement:</i>	7782-42-5	
Graphite (aucun dans ST2000)		2-40
<i>Dans SP3 seulement:</i>	1317-33-5	
Bisulphide de molybdène		15
<i>Dans les SP211, 221 (10-15%) et dans les types D (&lt;1%) uniquement:</i>	9002-84-0	
Polytétrafluoroéthylène (PTFE)		0,2-15

##### Remarques

Le matériau n'est pas connu pour contenir des produits chimiques toxiques listés dans la section 313, sous le titre III du «Superfund Amendments and Reauthorization Act» de 1986, et dans la réglementation 40 CFR, partie 372.

#### Identification des dangers

##### Effets potentiels sur la santé

Les pièces et semi-produits en polyimide VESPEL® sont sans danger à la livraison.

Dans le cas du SP211, 221 et des types D, l'usinage des pièces peut générer des particules contenant du polytétrafluoroéthylène (PTFE). L'usinage au moyen d'un outil émoussé ou sans refroidissement peut conduire à des températures excédant 260°C. Le principal danger lié au PTFE est l'inhalation des fumées dégagées en cas de surchauffe (>260°C) ou de combustion, ce qui provoque une fièvre dite «des fumées de polymères». Il s'agit d'une affection passagère semblable à la grippe avec fièvre, frissons et parfois de la toux, d'une durée approximative de 24 heures. Les fumeurs doivent éviter la contamination du tabac par ce produit. Lorsque le PTFE surchauffe ou brûle, il peut également dégager de petits volumes de fluorures de carbone et d'hydrogène.

##### Poly-N,N'-(p,p'-oxydiphénylène) pyroméllitimide

La résine polymère irrite légèrement la peau, mais ne provoque pas d'affections cutanées chez l'animal. Les effets constatés après une seule exposition par inhalation se traduisent par une gêne et des difficultés respiratoires (LC50 4 heures: 15 600 mg/m<sup>3</sup> chez le rat). L'effet d'expositions répétées par voie orale se traduit par une réduction de la consommation de nourriture et de la prise de poids.

Sur l'être humain, une surexposition sur la peau peut se traduire par une irritation cutanée gênante ou une éruption. L'inhalation peut entraîner une irritation des voies respiratoires supérieures, accompagnée de toux et de gêne. Aucune information acceptable n'est disponible pour prévoir avec certitude les effets d'une exposition excessive par contact oculaire ou par ingestion. Ni perméation cutanée significative, ni toxicité systémique après un contact ne paraissent probables. Aucune sensibilisation humaine n'a été signalée.

##### Graphite

Très faible toxicité par ingestion (LD50 par voie orale >5000 mg/kg chez le rat). Ce composé n'irrite pas les yeux. Les effets d'une surexposition sur la santé humaine par inhalation de longue durée peuvent se traduire par des affections chroniques des poumons avec des symptômes d'insuffisance pulmonaire. Les personnes souffrant déjà d'affections pulmonaires peuvent se montrer plus sensibles aux effets toxiques d'une exposition excessive au graphite.

##### Bisulfure de molybdène

Aucune information acceptable n'est disponible pour prévoir avec certitude les effets chez l'homme d'une exposition excessive à ce composé.

## Polytétrafluoroéthylène (PTFE)

Le composé n'irrite pas la peau. Une seule exposition par inhalation de poussières hautement concentrées provoque une irritation des poumons chez l'animal. Des doses répétées par voie orale n'ont pas montré d'effets toxiques, mise à part l'altération du nombre de globules blancs après une exposition de longue durée (25% du régime alimentaire pendant 90 jours). Des essais montrent qu'il n'y a pas d'effets toxiques sur le développement de l'animal, ni de dommages génétiques chez l'animal ou dans des cultures de cellules bactériennes.

### Effets d'une surexposition sur la santé humaine

L'inhalation des fumées dégagées par la combustion du PTFE peut provoquer la fièvre des fumées de polymères. Il s'agit d'une affection passagère semblable à la grippe avec fièvre, frissons et parfois de la toux, d'une durée approximative de 24 heures. Selon certains rapports, il existe des affections persistantes des poumons, en particulier chez les fumeurs, qui ont été atteints à plusieurs reprises par la fièvre des fumées de polymères. En raison de facteurs aggravants comme les expositions mixtes et l'habitude de fumer, les conclusions de ces rapports sont aléatoires. Une protection contre une exposition prolongée doit également protéger contre des effets chroniques potentiels. Les fumeurs doivent éviter la contamination du tabac par ce produit et se laver les mains avant de fumer. Aucune perméation cutanée significative après un contact ne paraît probable. Aucune sensibilisation humaine n'a été signalée. Lorsque le PTFE est en surchauffe ou brûle, il peut également dégager de petits volumes de fluorures de carbonyle et d'hydrogène.

L'inhalation de *fluorure d'hydrogène* à faible concentration peut se traduire, dans un premier temps, par des symptômes d'étouffement, de toux et une irritation grave des yeux, du nez et de la gorge. Après 1 à 2 jours sans symptômes, une poussée de fièvre, des frissons, des difficultés respiratoires, une cyanose et un oedème pulmonaire peuvent se déclarer. Une surexposition chronique ou aiguë au fluorure d'hydrogène peut léser le foie et les reins.

L'inhalation, l'ingestion ou le contact cutané ou oculaire avec le *fluorure de carbonyle* peuvent provoquer dans un premier temps : une irritation gênante de la peau ou une irruption ; une lésion des yeux avec ulcération de la cornée ou du tissu conjonctif ; une irritation des voies respiratoires supérieures ou une irritation passagère des poumons accompagnée de toux, de gêne, de difficulté ou d'insuffisance respiratoire. Comme avec le phosgène, les symptômes ne se manifestent pas forcément immédiatement.

Les personnes souffrant déjà d'affections pulmonaires peuvent se montrer plus sensibles aux effets toxiques d'une exposition excessive aux produits de décomposition thermique du PTFE.

### Effet cancérigène

Aucun des composants de ce matériau n'est répertorié par l'IARC, le NTP, l'OSHA ou l'ACGIH comme produit cancérigène.

## Premiers secours

### First aid

#### *Inhalation*

Aucune intervention spécifique préconisée, le composé ne présentant pas de danger dans ce cas. Consultez un médecin, le cas échéant.

#### *Contact cutané*

Le composé n'est pas dangereux dans ce cas, mais il est recommandé de nettoyer la peau après usage.

#### *Contact oculaire*

Dans ce cas, rincez immédiatement les yeux à grande eau pendant au moins 15 minutes. Appelez un médecin.

#### *Ingestion*

Aucune intervention spécifique préconisée, le composé ne présentant pas de danger dans ce cas. Consultez un médecin, le cas échéant.

## En cas d'incendie

### Inflammabilité

Dangers liés à l'incendie et à l'explosion.

Les émanations dangereuses (gaz et vapeurs) produites dans le cas d'un incendie sont les suivantes : oxyde de carbone, dioxyde de carbone, fumées. Les SP211, 221 et les types D peuvent également dégager des fluorures d'hydrogène et de carbonyle, ainsi que des hydrocarbures fluorés à faible poids moléculaire.

### Produit d'extinction

Utilisez le produit approprié au matériau environnant pour circonscrire l'incendie.

### Instructions de lutte contre l'incendie

Portez un appareil respiratoire autonome. Lors d'un incendie, les SP211, 221 et les types D dégagent des fumées de fluorure d'hydrogène, qui, au contact de l'eau, produisent de l'acide fluorhydrique. Portez des gants en *Néoprène* pour manipuler les poussières de combustion produites par ces compositions.

## En cas de déversement accidentel

### Sécurité (Personnel)

**Remarque :** reportez-vous aux rubriques «En cas d'incendie» et «Manipulation (Personnel)» avant de procéder au nettoyage. Utilisez l'équipement de protection approprié pour effectuer le nettoyage.

### Nettoyage

Récupérez le matériau en bon état ou faiblement contaminé pour le réutiliser ou faire une réclamation. Nettoyez avec une pelle ou un balai.

## Manipulation et stockage

### Manipulation (Personnel)

Évitez la contamination des cigarettes et du tabac par la poussière de polymère.

Évitez d'inhaler les poussières.

### Manipulation (aspects physiques)

Évitez la production de poussières.

## Surveillance des expositions/protection du personnel

### Contrôles techniques

Utilisez un système de ventilation local pour évacuer les poussières issues de la coupe et du ponçage.

### Équipement de protection du personnel

#### Protection des yeux et du visage

Pendant les opérations d'usinage, portez l'équipement de protection requis tel que des lunettes protectrices contre la poussière ou des lunettes de sécurité avec parements de protection latéraux.

#### Masques respiratoires

Pendant les opérations de rectification, de ponçage ou de sciage, utilisez un masque à filtration d'air approuvé par le NIOSH/MSHA doté d'une cartouche ou d'une boîte filtrante si la concentration de particules dans l'air est susceptible de dépasser les limites d'exposition tolérées.

## Exposition

### Limites d'exposition

Les pièces et semi-produits en polyimide VESPEL® figurent tous dans la liste des synonymes VSP001.

PEL (OSHA) Particules (non classifié autrement)  
15 mg/m<sup>3</sup>, 8 heures TWA, poussières totales  
5 mg/m<sup>3</sup>, 8 heures TWA, poussières respirables

### Autres limites d'exposition applicables

Poly-N,N'-(p,p'-oxydiphénylène) pyroméllitimide

PEL (OSHA) Néant  
TLV (ACGIH) Néant  
AEL\* (DuPont) 10 mg/m<sup>3</sup>, 8 heures TWA, poussières totales  
5 mg/m<sup>3</sup>, 8 heures TWA, poussières respirables

Graphite (aucun dans le ST2000)

PEL (OSHA) 5 mg/m<sup>3</sup>, poussières respirables, 8 heures TWA  
TLV (ACGIH) 2 mg/m<sup>3</sup>, poussières respirables, 8 heures TWA  
AEL\* (DuPont) Néant

Bisulfure de molybdène

PEL (OSHA) 5 mg/m<sup>3</sup>, en tant que Mo  
Composés non solubles: 10 mg/m<sup>3</sup>,  
poussières totales, 8 heures TWA

TVL (ACGIH) 10 mg/m<sup>3</sup>, en tant que Mo  
5 mg/m<sup>3</sup>, composés solubles en tant que Mo, 8 heures TWA  
AEL\* (DuPont) Néant

Polytétrafluoroéthylène (PTFE)

PEL (OSHA) Néant  
TLV (ACGIH) Néant  
AEL\* (DuPont) 10 mg/m<sup>3</sup>, 8 heures TWA, poussières totales  
5 mg/m<sup>3</sup>, 8 heures TWA, poussières respirables

## Propriétés chimiques et physiques

### Données physiques

Point de fusion Non  
% éléments volatils NA  
Solubilité dans l'eau Non  
Odeur Aucune  
Forme Pièces et semi-produits solides  
Masse spécifique 1,33 à 1,67

## Stabilité et réactivité

### Stabilité chimique

Stable aux conditions normales de température et de stockage.

### Décomposition

Se décompose à la chaleur.

Température de décomposition: le produit ne présente pas de décomposition significative jusqu'à 288°C. Il supporte de courtes expositions jusqu'à 482°C sans décomposition notable.

Un chauffage à une température <288°C peut produire des particules de matières susceptibles de provoquer la fièvre des fumées de polymères. Les SP211, SP221 et les types D peuvent dégager de faibles volumes de fluorure d'hydrogène et de carbonyle à 400°C, et des volumes plus importants à plus haute température.

Emanations dangereuses (gaz et vapeurs) d'oxyde de carbone au-delà de 300°C; les SP211, 221 et les types D dégagent de faibles quantités de fluorure d'hydrogène.

### Polymérisation

Aucune.

\* AEL: limite d'exposition acceptable définie par DuPont. Si les limites d'exposition imposées par l'administration dans le cadre professionnel sont inférieures aux limites AEL, elles ont priorité sur ces dernières.



## Toxicologie

### Données relatives aux animaux

#### Polytétrafluoroéthylène (PTFE)

Le composé n'irrite pas la peau. Une seule exposition par inhalation de poussières hautement concentrées provoque une irritation des poumons chez l'animal. Des doses répétées par voie orale n'ont pas montré d'effets toxiques, mise à part l'altération du nombre de globules blancs après une exposition de longue durée (25 % du régime alimentaire pendant 90 jours). Des essais montrent qu'il n'y a pas d'effets toxiques sur le développement de l'animal, ni de dommages génétiques chez l'animal ou dans des cultures de cellules bactériennes.

#### Bisulfure de molybdène

Absorption cutanée LD50 >16000 mg/kg chez le lapin.  
LD50 par voie orale >16000 mg/kg chez le rat.

Les animaux exposés à des inhalations répétées ont montré une augmentation du rythme respiratoire. Une seule exposition par ingestion s'est traduite uniquement par une forte diarrhée. Aucun signe de toxicité ne s'est révélé à la suite d'expositions répétées.

## Environnement

### Toxicité

Contamination de l'eau.

La toxicité est supposée être faible en raison de l'insolubilité du produit dans l'eau.

## Mise au rebut

### Mise au rebut des déchets

Les options recommandées sont; (1) le recyclage, (2) l'incinération avec récupération d'énergie et (3) le stockage dans le sol. La haute valeur combustible de ce produit rend préférable la deuxième solution pour un matériau qui ne peut pas être recyclé, mais l'incinérateur doit être capable de supprimer les produits de combustion acides. Le traitement, le stockage, le transport et la mise au rebut doivent s'effectuer conformément aux réglementations en vigueur.

## Transport

### Information

DOT

dénomination du produit Non réglementé.

## Réglementation

### Réglementation fédérale américaine

Rapport TSCA Enregistré/Pris en compte.

### Lois des états «Right-To-Know»

Aucune des substances répertoriées comme dangereuses par les états mentionnés ci-après n'entre dans la composition des produits concernés par la présente Fiche de sécurité produit, sauf indication contraire.

SUBSTANCES DANGEREUSES RÉPERTORIÉES PAR L'ÉTAT DE PENNSYLVANIE PRÉSENTES À UNE CONCENTRATION SUPÉRIEURE OU ÉGALE À 1 % (0,01 % POUR DES SUBSTANCES DANGEREUSES SPÉCIFIQUES) – graphite dans les compositions SP21, 22, 211, 221 et du type ST, polytétrafluoroéthylène dans les SP211, 221. A notre avis, le polytétrafluoroéthylène est répertorié par erreur et nous avons demandé qu'il soit retiré de la liste.

**AVERTISSEMENT** – SUBSTANCES DÉCLARÉES CANCÉRIGÈNES PAR L'ÉTAT DE CALIFORNIE OU CAUSANT DES MALFORMATIONS CONGÉNITALES OU D'AUTRES DANGER TOUCHANT LA FÉCONDITÉ – aucune connue.

SUBSTANCES DANGEREUSES DANS LE CADRE PROFESSIONNEL RÉPERTORIÉES PAR L'ÉTAT DU NEW JERSEY PRÉSENTES À UNE CONCENTRATION SUPÉRIEURE OU ÉGALE À 1 % (0,1 % POUR DES SUBSTANCES RECONNUES COMME CANCÉRIGÈNES, MUTAGÈNES OU TÉRATOGENES): bisulfure de molybdène.

## Autres informations

### NFPA, NPCA-HMIS

Classification NFPA

Santé:	2
Inflammabilité:	1
Réactivité:	0

### Informations complémentaires

**ATTENTION:** Ne doit pas être utilisé comme implant humain permanent. Pour les autres applications médicales, consultez l'avertissement de DuPont se référant aux applications médicales (référence H-50102)

Les données figurant dans la présente Fiche de sécurité produit (MSDS) concernent uniquement les matériaux spécifiquement mentionnés et non une utilisation avec d'autres matériaux ou dans quelque procédé que ce soit.

Responsable de la Fiche de sécurité produit: J.P. Bollmeier

Address: DuPont Engineering Polymers  
Chestnut Run Plaza 713  
Wilmington, DE 19880-0713

Telephone: 302-999-4257

Pour tout renseignement concernant les polymères techniques, veuillez contacter :

Belgique / België  
Du Pont de Nemours (Belgium)  
Antoon Spinostraat 6  
B-2800 Mechelen  
Tel. (15) 44 10 11  
Telex 22 554  
Telefax (15) 44 14 08

Deutschland  
Du Pont de Nemours  
(Deutschland) GmbH  
DuPont Straße 1  
D-61343 Bad Homburg  
Tel. (06172) 87 0  
Telex 410 676 DPD D  
Telefax (06172) 87 27 01

España  
Du Pont Ibérica S.A.  
Edificio L'Illa  
Avda. Diagonal 561  
E-08029 Barcelona  
Tel. (3) 227 60 00  
Telefax (3) 227 62 00

France  
Du Pont de Nemours (France) S.A.  
137, rue de l'Université  
F-75334 Paris Cedex 07  
Tel. 01 45 50 65 50  
Telex 206 772 dupon  
Telefax 01 47 53 09 67

Italia  
Du Pont de Nemours Italiana S.p.A.  
Via Aosta 8  
I-20063 Cernusco sul Naviglio (Mi)  
Tel. (02) 25 302.1  
Telefax (02) 92 107 845

Österreich  
Interowa  
Fürer-Haimendorf KG  
Bräuhausgasse 3-5  
A-1050 Wien  
Tel. (01) 512 35 71  
Telex 112 993 IROWA A  
Telefax (01) 512 35 71 12/  
512 35 71 31

Schweiz / Suisse / Svizzera  
Dolder AG  
Immengasse 9  
Postfach 14695  
CH-4004 Basel  
Tel. (061) 326 66 00  
Telex 962 306 DOL CH  
Telefax (061) 326 62 04

Sverige  
DuPont Sverige AB  
Box 23  
S-164 93 Kista (Stockholm)  
Tel. +46 8-750 40 20  
Telefax +46 8-750 97 97

United Kingdom  
Du Pont (U.K.) Limited  
Maylands Avenue  
GB-Hemel Hempstead  
Herts. HP2 7DP  
Tel. (01442) 34 65 00  
Telefax (01442) 24 94 63

Asia Pacific  
Du Pont Kabushiki Kaisha  
Arco Tower, 14th Fl.  
8-1, Shimomeguro 1-chome  
Meguro-ku, Tokyo 153  
Tel. (03) 5424 6100

USA  
DuPont Engineering Polymers  
Barley Mill Plaza, Building #22  
P.O. Box 80022  
Wilmington, Delaware 19880  
Tel. (302) 892 0541  
Telefax (302) 892 0737

Les informations fournies ont été établies sur la base des connaissances techniques en notre possession. Ces informations sont susceptibles d'être modifiées en tout temps au gré de nos nouvelles connaissances et de nos expériences. Ces informations correspondent aux propriétés typiques du matériau et ne concernent que ce matériau. Sauf indication contraire, les informations fournies peuvent ne pas correspondre aux propriétés typiques du matériau lorsque celui-ci est utilisé avec d'autres matériaux, des additifs ou dans certains procédés. Ces informations ne doivent pas servir à établir des limites de spécification et ne doivent pas être utilisées telles quelles pour servir de base de design. Ces informations ne doivent pas non plus se substituer aux tests éventuellement nécessaires à déterminer si le matériau en question est adapté à l'usage auquel vous le destinez. En l'absence de connaissances particulières de vos conditions d'utilisation du matériau, DuPont n'assume aucune obligation de résultat de même qu'aucune responsabilité en relation avec l'utilisation des informations fournies. Les informations contenues dans cette brochure ne sauraient être interprétées comme une licence sous quelque brevet que ce soit ou comme une invitation à enfreindre des droits découlant de la propriété intellectuelle.

**Attention :** ne doit pas être utilisé comme implant humain permanent. Pour d'autres applications médicales, veuillez consulter l'avertissement de DuPont se référant aux applications médicales «DuPont Medical Caution Statement, H-50102-1».

Pour les pays autres que ceux mentionnés ci-dessus, veuillez contacter :

Du Pont de Nemours International S.A.  
2, chemin du Pavillon  
CH-1218 Le Grand-Saconnex,  
Genève  
Tél. (022) 717 51 11  
Télex 415 777 DUP CH  
Télécopie (022) 717 52 00

**Adresse Internet:**  
<http://www.dupont.com/enggpolymerseurope>

Innovez avec  
les polymères techniques  
de DuPont

06.99 Imprimé en Suisse  
H-53668-1 © Marque déposée de DuPont de Nemours



Vespel®  
Par DuPont