

## ÉPREUVE COMMUNE DE TIPE - Partie D

**TITRE : Les micro-accéléromètres**

Temps de préparation : .....2 h 15 minutes

Temps de présentation devant le jury : .....10 minutes

Entretien avec le jury : .....10 minutes

### **GUIDE POUR LE CANDIDAT :**

Le dossier ci-joint comporte au total : 10 pages

Document principal : 4 pages

Annexes : 6 pages

Travail **suggéré** au candidat :

Le document principal de ce dossier est une présentation de type « vulgarisation » des accéléromètres intégrés. A l'aide des annexes et de vos connaissances, faites-en une présentation plus scientifique et technologique. Vous pouvez aussi proposer une modélisation mécanique simple (poutre, masse - ressort) et électrique (capacité différentielle) de l'élément sensible.

### **CONSEILS GENERAUX POUR LA PREPARATION DE L'EPREUVE :**

\* Lisez le dossier en entier dans un temps raisonnable.

\* Réservez du temps pour préparer l'exposé devant le jury.

- Vous pouvez écrire sur le présent dossier, le surligner, le découper ... mais tout sera à remettre au jury en fin d'oral.
- o En fin de préparation, rassemblez et ordonnez soigneusement TOUS les documents (transparents, *etc.*) dont vous comptez vous servir pendant l'oral, ainsi que le dossier, les transparents et les brouillons utilisés pendant la préparation. En entrant dans la salle d'oral, vous devez être prêts à débiter votre exposé.
- o A la fin de l'oral, vous devez remettre au jury le présent dossier, les transparents et les brouillons utilisés pour cette partie de l'oral, ainsi que TOUS les transparents et autres documents présentés pendant votre prestation.

## I.- Introduction

Depuis une dizaine d'années le domaine du capteur est en pleine évolution suivant en cela la progression fulgurante des technologies de fabrication des composants électroniques et plus particulièrement l'arrivée sur le marché industriel des  
5 microsystemes à signaux mixtes analogiques – numériques, ainsi que l'émergence des technologies MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems)

Un capteur est un organe de recueil d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique une autre grandeur physique de nature différente (la plus part du  
10 temps électrique). Vu de l'extérieur, le capteur peut se modéliser comme un générateur (capteur actif) ou comme une impédance (capteur passif). Certains capteurs sont dits « composites » c'est à dire composés de 2 parties ayant un rôle bien défini :

- Le corps d'épreuve : qui réagit sélectivement aux variations de la grandeur à mesurer.
- 15 • Le transducteur: lié au corps d'épreuve, qui traduit ses réactions en une grandeur physique exploitable.

Lorsque le corps d'épreuve et/ou l'élément sensible est en silicium, il peut être regroupé avec une électronique de prétraitement. Il s'agit alors de capteurs intégrés. Les  
20 avantages d'une telle structure sont nombreux : fiabilité, coût, dimensions réduites, meilleur conditionnement du signal.

Un capteur est dit intelligent quand il intègre une chaîne de mesure incluant un système dit intelligent (microcontrôleur) et une interface de communication  
25 bidirectionnelle. La chaîne de mesure est ainsi constituée du capteur principal sensible à la grandeur physique à mesurer, d'un ou plusieurs capteurs secondaires sensibles aux grandeurs physiques pouvant influencer sur le résultat de la mesure, de l'électronique de conditionnement et d'un système programmable à microcontrôleur .

30 Un des premiers microsystemes à avoir été développé et industrialisé est le micro-accéléromètre. Ses domaines d'utilisation sont variés, il est utilisé :

- Pour déclencher le gonflage des airbags des véhicules en cas de choc brutal.
- Dans les systèmes de navigation. Il sert au calcul et au contrôle des trajectoires des avions, missiles et automobiles, car toute modification de direction se traduit par un changement d'accélération.
- Dans le domaine du médical. Il est intégré dans les pacemakers, qui servent à stimuler le coeur défaillant des patients par des impulsions électriques. L'accéléromètre détecte alors tout changement de rythme d'activité physique. Ainsi, quand le patient commence à courir, le pacemaker modifie les impulsions envoyées au coeur pour les adapter à l'intensité de l'effort physique.
- Et dans le futur, on pense intégrer un accéléromètre dans les stylos pour sécuriser les signatures : enregistrement temps réel de la signature (tracé, vitesse, accélération).

## II. Les accéléromètres intégrés pour Airbag

Depuis leur lancement à bord des véhicules automobiles à la fin des années 70, les systèmes de protection par airbag (coussins gonflables) ont connu une évolution considérable. Leur importance pour la sécurité routière est aujourd'hui unanimement reconnue par les industriels, les pouvoirs publics et les consommateurs.

Aujourd'hui, en Europe, la plupart des véhicules commercialisés sont équipés de coussins gonflables, à l'avant comme à l'arrière. Selon certaines études, 180 millions d'airbags seront en service dans le monde en 2010, et de nouvelles opportunités vont contribuer à la croissance de ce marché. Parmi celles-ci, notons la généralisation des coussins latéraux pour la protection de la tête, du torse et des genoux, les systèmes de détection de tonneau et de présence des passagers.

Les réglementations nationales, ainsi que les organismes indépendants spécialisés dans les essais d'impact, comme EuroNCAP, obligent les constructeurs à réaliser des véhicules toujours mieux équipés et susceptibles de passer avec succès les tests de sécurité les plus sévères. Pour répondre à ces exigences de plus en plus fortes, le nombre de capteurs d'accélération pour détecter un impact a considérablement augmenté. De fait, jusqu'à six accéléromètres peuvent équiper les modèles hauts de gamme.

Les accéléromètres utilisés sont réalisés à partir des techniques de micro-usinage. Ils doivent avoir de petites dimensions et être disponibles en gros volume de production. Bien que les exigences de qualité soient strictes, les coûts doivent être extrêmement faibles, d'où la nécessité d'utiliser les technologies courantes en conception de circuit intégrés. Le marché actuel offre plusieurs types de capteurs d'accélération qui répondent aux exigences des systèmes d'airbag. Les deux principaux sont les capteurs à piézorésistances et les capteurs capacitifs.

• Les accéléromètres à piézorésistance consistent en un substrat micro-usiné, comprenant une masse sismique suspendue par une ou plusieurs poutres de flexion en silicium. Les poutres comportent des piézorésistances qui afin de fournir un signal maximal sont placées sur les côtés des poutres.

• Le principe des capteurs capacitifs, structures plus complexes en silicium, consiste à traduire le déplacement de la masse sismique mobile en une mesure de variation de capacité. Pour garantir une excellente linéarité et la possibilité d'intégrer une boucle retour électromécanique, le système est conçu comme une capacité différentielle.

Dans les applications de sécurité, il est essentiel que l'accéléromètre ait un temps de réponse très court. La réactivité du système est améliorée si le capteur répond sans oscillations. Pour contrôler l'amortissement on peut placer les capteurs dans un bain d'huile. Une autre possibilité est de construire des gaps (canaux) d'air étroits entourant la masse sismique dans la direction de la déviation. Dans ce cas l'amortissement est dû à l'écoulement de l'air dans le gap.

Pour obtenir un capteur intégré intelligent, il faut ajouter au transducteur une électronique de traitement qui prend en charge le conditionnement, l'amplification, la conversion et le filtrage des signaux (ASIC : Application Specific Integrated Circuit). Plutôt que de la concevoir sur le même substrat que l'élément sensible, et bien qu'ils fassent appel aux mêmes technologies de fabrication, les fabricants d'accéléromètres préfèrent une solution « multi puces ». Celle-ci consiste à assembler dans un même boîtier deux puces distinctes.

Cette intégration de deux puces dans un boîtier en plastique apporte des avantages notables. Cela permet notamment de rendre indépendant les processus de

fabrication de l'élément sensible, et celui du circuit électronique. De plus la taille et l'épaisseur du transducteur et de l'ASIC peuvent être différentes.

105 Une des améliorations du transducteur consiste en effet à augmenter l'épaisseur du substrat par rapport à un circuit « classique ». Cette augmentation est obtenue en empilant plusieurs couches de silicium épitaxié jusqu'à une épaisseur de 20  $\mu\text{m}$  en utilisant la méthode DRIE (gravure ionique réactive profonde).

110 Cette amélioration, outre une réaction mécanique amortie, assure une augmentation de la plage de variation de la capacité en fonction de l'accélération. Ce qui a pour effet d'accroître le rapport signal/bruit du transducteur, et donc de réduire le niveau de gain nécessaire dans la chaîne de traitement du signal. Les erreurs induites par le capteur et l'Asic sont alors diminuées, de même que l'erreur globale affectant le système.

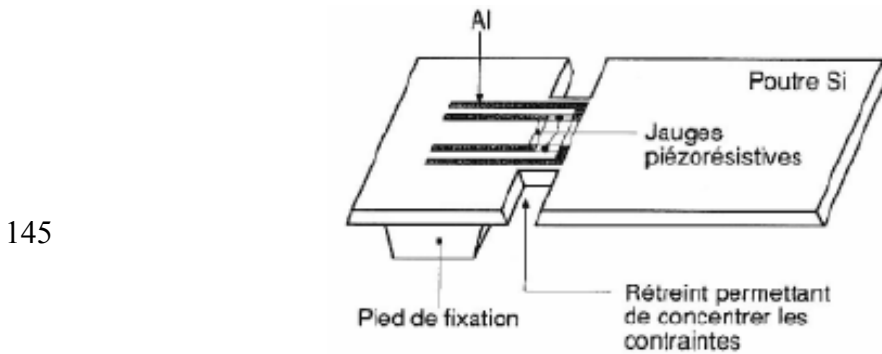
115 La mise en boîtier de la structure Mems est cruciale, compte tenu de son impact direct sur les caractéristiques finales du produit (contraintes mécaniques, transmission des chocs, etc.), sa fiabilité et son coût. Partie centrale de l'accéléromètre, l'élément sensible doit être protégé du plastique injecté lors du moulage du boîtier. Ce problème est résolu en couvrant la structure mobile d'un capot en silicium, scellé hermétiquement par une soudure verre. Ce processus protège l'élément sensible des particules susceptibles de perturber son fonctionnement. Avec une telle protection, le transducteur traverse toutes les étapes ultérieures (découpe, conditionnement) sans le moindre dommage.

### III Conclusion

125 L'accéléromètre intégré de type MEMS a connu un formidable développement industriel ces dernières années. Ses dimensions réduites, son faible coût, sa fiabilité, lui ont ouvert le domaine des applications grand public. En effet on est passé de 24 millions de vente en 1996 à 90 millions en 2002. Avec l'apparition des technologies NEMS (Nano Electro Mechanical Systems), cet essor ne devrait pas faiblir. Pour finir citons l'arrivée (récente en France) des manettes de jeu à accéléromètre intégré du type 130 Wii de la firme Nintendo ou Sixaxis de chez Sony.

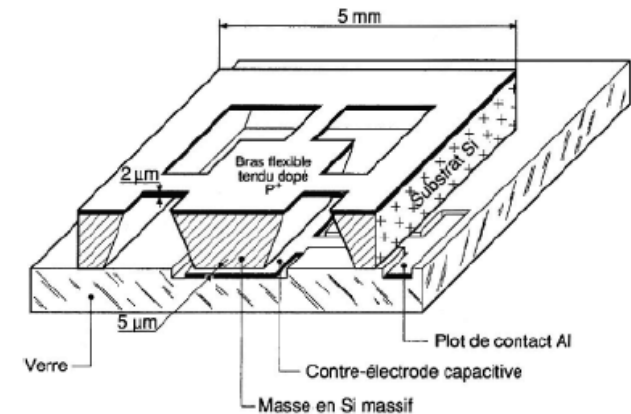
## ANNEXE 1 : EXEMPLES de CAPTEURS d'accélération

135 La figure 1 représente un capteur d'accélération industrialisé, la dynamique de  
mesure est de l'ordre du g pour une bande passante de quelques centaines de hertz et  
une sensibilité de 1 mV/g. Basé sur un principe piézorésistif, il permet théoriquement le  
passage du continu, mais les fortes dérives thermiques ( $10 \mu\text{V/K}$ ) induites par les  
contraintes provenant du collage pied/boîtier le limitent souvent à la mesure des  
140 accélérations variables (au-dessus de 0,01 Hz).



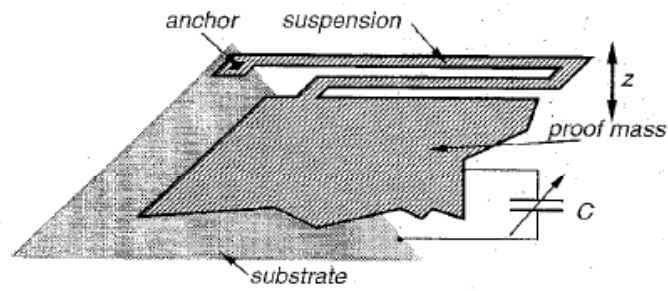
150 Les mouvements de la poutre lors des accélérations entraînent des déformations  
dans la zone du rétreint, qui sont à l'origine des contraintes mécaniques sur les jauges  
collées sur cette poutre.

Un procédé de réalisation d'un capteur en silicium usiné est décrit  
155 schématiquement sur la figure 2. Les ponts ou bras flexibles sont fortement tendus, la  
masse suspendue se déplace verticalement, modifiant l'entrefer capacitif. Pour une  
dynamique de l'ordre de g, la dérive thermique reste faible ( $0,01 \text{ %/K}$ ) et permet une  
utilisation pour des mesures  
160 d'accélérations continues. La bande  
passante (100 Hz) est limitée  
volontairement par le frottement  
visqueux du gaz se déplaçant dans  
l'entrefer ; on élimine ainsi les  
phénomènes de surtension à la  
165 résonance.



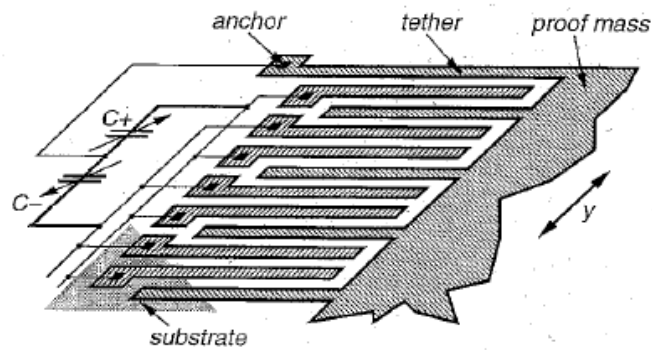
Les figures 3 et 4 présentent le principe d'un accéléromètre capacitif simple dans l'axe z, et « inter digité » monté en capacité différentielle dans l'axe y.

170



175

(a)



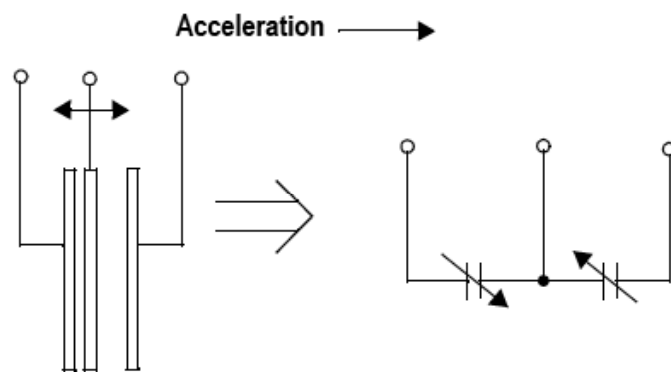
180

(b)

185

Figure 3 : accéléromètre capacitif en z (a) et en y (b)

190



195

Figure 4 : principe d'une cellule capacitive différentielle

## ANNEXE 2 : TECHNOLOGIE DU MICRO-USINAGE COLLECTIF

### 200 A. Gravure plasma

On qualifie habituellement de micro-usinées des structures exploitant les propriétés mécaniques et élastiques des matériaux. Elles comportent en général au moins un élément flexible (poutre, pont ou membrane) et elles sont réalisées par des attaques chimiques ou physico-chimiques profondes (souvent plus de 100  $\mu\text{m}$ ). Ces  
205 attaques ont pour objet d'isoler des structures élastiques au sein d'un matériau de même nature (en général, du silicium) ou bien de nature différente (par exemple, réalisation d'une poutre en polysilicium par gravure d'une couche d'oxyde sous-jacente).

Il est possible d'attaquer le silicium et la plupart des matériaux par des procédés  
210 plasma RIE (Reactive Ion Etching : gravure ionique réactive). Très schématiquement, les substrats à graver sont placés sur une des électrodes (la cathode) d'un condensateur plan soumis à une polarisation continue superposée à une oscillation haute fréquence, généralement 13,56 MHz. Le gaz sous basse pression (environ 0,1 Pa) présent dans l'entrefer est alors ionisé et devient fortement réactif. La gravure qui se produit alors au  
215 niveau des substrats est liée aux deux phénomènes suivants : une attaque chimique isotrope par les espèces réactives ; un bombardement ionique réalisant une gravure anisotrope (verticale).

La nature du matériau attaqué et des gaz utilisés ( $\text{SF}_6$  ,  $\text{CHF}_3$  ,  $\text{CCl}_4$  ...), la pression dans l'enceinte et la puissance haute fréquence déterminent le taux  
220 d'anisotropie et la vitesse de gravure.

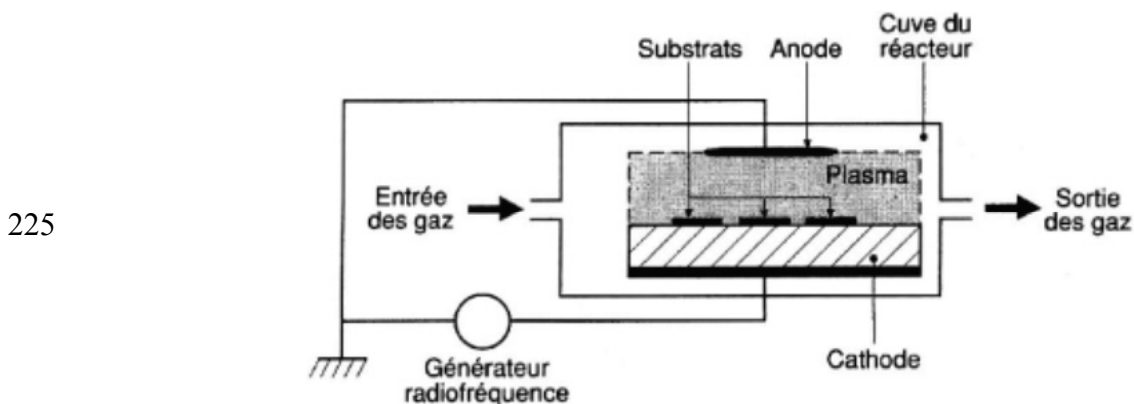
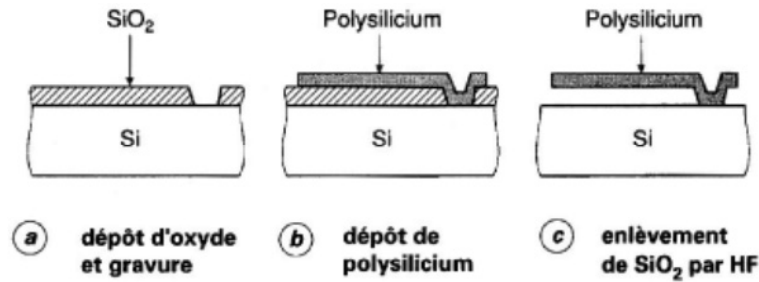


Figure 5 : Principe d'un réacteur d'attaque plasma

230



235

Figure 6 : Réalisation d'une poutre de polysilicium.

## 240 B. Techniques d'assemblage

Pour la réalisation de structures complexes, il est souvent nécessaire de réaliser l'assemblage de deux substrats de même nature ou de natures différentes. Nous pouvons citer la réalisation de cavités hermétiques (pour des capteurs de pression absolue ou des gyromètres acoustiques), l'obtention d'une structure capacitive entre une électrode mobile et d'une électrode fixe (accéléromètres, capteurs de pression, microphones...) ou bien l'assemblage du capteur proprement dit et d'une structure de découplage vis-à-vis des contraintes mécaniques extérieures (*encapsulation* intermédiaire).

245

Le procédé d'assemblage doit répondre aux exigences suivantes :

250

- mettre en oeuvre des matériaux de coefficients de dilatation voisins ;
- pouvoir être réalisé de manière collective ;
- faire intervenir des conditions opératoires, en particulier la température, ne conduisant pas à la dégradation des structures déjà réalisées .
- permettre l'alignement (la superposition) avec une précision suffisante, en général quelques micromètres, des motifs réalisés dans les deux substrats à assembler ;
- garantir une bonne stabilité de l'assemblage dans le temps et pour des températures de  $-55$  à  $+125$  °C.

255

260

Les colles ne peuvent en général être utilisées pour réaliser l'assemblage. Elles présentent les inconvénients d'une difficulté d'obtention d'une bonne homogénéité sur des surfaces importantes (de l'ordre de  $80\text{cm}^2$  pour des substrats usuels) ; d'une épaisseur de colle mal maîtrisée et souvent importante (de l'ordre de  $50\ \mu\text{m}$ ) conduisant à des défauts de parallélisme et ne permettant pas des réalisations telles que des

265 capteurs capacitifs où l'entrefer doit rester faible et parfaitement connu ; des  
températures de transition vitreuse faibles, souvent inférieures à 80 °C pour la plupart  
des colles conductrices, d'où des effets d'hystérésis très importants lors de cycles  
thermiques. L'usage des colles est par conséquent souvent limité à l'encapsulation de  
capteurs.

270

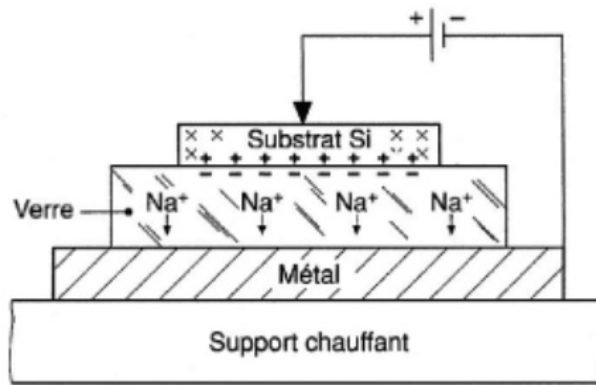
Il est souvent intéressant d'associer au silicium un matériau non conducteur qui  
puisse porter des métallisations localisées et donc électriquement isolées. De telles  
structures sont ainsi largement utilisées pour réaliser des capteurs capacitifs. L'une des  
électrodes est disposée sur le substrat isolant et l'autre constituée d'une pièce de silicium  
275 flexible. Pour ce faire on utilise presque exclusivement des substrats de verre  
assemblés au silicium par une soudure dite *électrostatique* .

Après nettoyage et mise en contact mécanique des deux substrats, le procédé  
consiste à appliquer une différence de potentiel de l'ordre de 500 V (pour du verre de  
1 mm d'épaisseur). Le pôle positif se trouve sur le silicium et le pôle négatif sur une  
280 plaque métallique en contact avec le verre. L'ensemble est chauffé à une température de  
l'ordre de 450 °C. Les verres utilisés contiennent de grandes quantités d'ions alcalins (de  
l'ordre de 8 %) essentiellement Na<sup>+</sup>. Ces ions, mobiles à des températures supérieures à  
200 °C, se déplacent alors sous l'action du champ électrique en laissant derrière eux une  
charge négative conduisant à l'apparition, à la surface du silicium, d'une charge image  
285 positive. L'interaction attractive de ces charges réalise la *soudure* verre - silicium.

En plus d'une forte concentration en sodium, les verres utilisés présentent un  
coefficient de dilatation proche de celui du silicium de manière à limiter les contraintes  
lors de la soudure et durant les cycles thermiques.

290 Les avantages de ce type de soudure sont essentiellement la possibilité d'utiliser  
un procédé collectif; la bonne reproductibilité de la liaison ; une température compatible  
avec la tenue des métallisations aluminium (température de fusion de 660 °C) ; un  
alignement avec le silicium très aisé du fait de la transparence du verre, auquel s'ajoute  
une possibilité de détection des défauts (qui se manifestent par des figures  
295 d'interférences lumineuses) ; une très bonne stabilité de l'assemblage et des contraintes  
mécaniques qui résultent de la proximité des coefficients de dilatation.

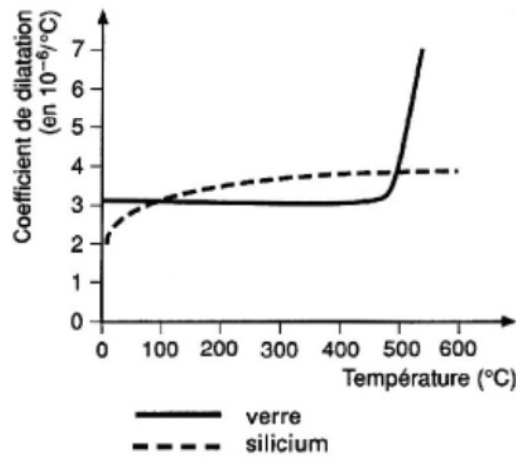
300



305

Figure 7 : soudure électrostatique verre- silicium

310



315

Figure 8 : Coefficients de dilatation du silicium et du verre (corning

7740)