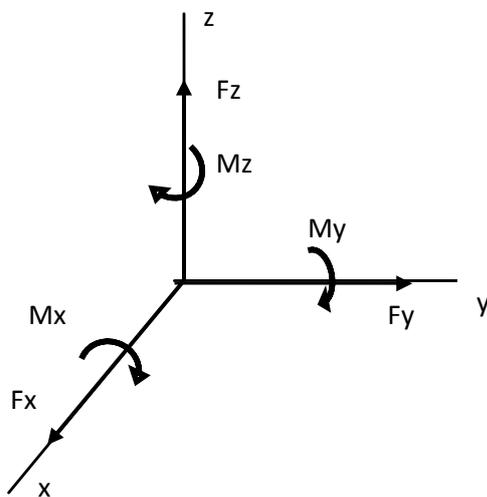


# La Mesure de force

## Les Forces

### PROBLEMATIQUE VECTORIELLE

En mécanique classique une force est définie comme " une action susceptible de modifier la quantité de mouvement d'un point matériel". Il en résulte qu'une force a les attributs d'un **vecteur** et se caractérise par un **point d'application**, une **direction** et une **intensité**. D'autre part, l'ensemble des forces qui s'appliquent en un point peut se réduire à un système composé de 3 forces  $F_x - F_y - F_z$  orthogonales entr'elles et de 3 moments  $M_x - M_y - M_z$  sur ces 3 axes. Cet ensemble prend le nom de torseur des forces appliqué en ce points.



Cette problématique vectorielle rend complexe la mesure des forces et des couples. Dans la pratique, les forces pures uni-directionnelles et isolées n'existent pas. A la force à mesurer se superposent toujours d'autres forces et moments qui parasitent celle-ci et des précautions doivent être prises pour s'en affranchir. Enfin la mesure d'une force nécessite la détermination des deux caractéristiques - point d'application et direction – préalablement à la mise en œuvre des techniques et des moyens de mesure de son intensité

Il est utile également de préciser qu'un corps au repos est soumis à un ensemble de forces et de couples dont la résultante doit être nulle.

### ACTION ET REACTION

Cette même mécanique nous enseigne également le principe de l'action et de la réaction selon lequel "si un point matériel P1 exerce une force sur un point matériel P2, alors P2 exerce une force égale et opposés sur P1". Ce principe est important pour la mesure d'une force. Il impose de prendre cette autre force en considération et la façon dont elle est appliquée à l'instrument de mesure de la force car elle peut avoir une grande incidence sur la mesure effectuée.

### ISOSTATISME

L'isostatisme caractérise le contact entre deux solides, réalisé avec le nombre de liaison strictement minimal. Ceci simplifie le système des forces et des moments assurant la liaison et permet de les identifier. D'où une plus grande maîtrise du système des forces en présence et par là-même de meilleures mesures.

### ACTION A DISTANCE

La théorie de l'élasticité des matériaux conclut que les déformations sous l'action des contraintes sont des fonctions des contraintes d'autant plus linéaires que les déformations sont éloignées des points d'application de ces contraintes. Traduit en clair, cela veut dire qu'un instrument de mesure de force muni de jauges d'extensométrie a des dimensions d'autant plus importantes que la précision recherchée est grande.

## Les dynamomètres

### GENERALITES

Le terme **dynamomètre** désigne un instrument utilisé pour mesurer une force. Celui-ci est également utilisé parfois pour désigner une machine d'essais capable d'exercer des forces avec une précision donnée. Seule la première acceptation est retenue.

Un dynamomètre est constitué d'un **capteur** comprenant un corps d'épreuve métallique qui reçoit la force à mesurer et se déforme élastiquement sous son action. Dans les capteurs modernes cette déformation est communiquée à un circuit électrique miniature comprenant des jauges d'extensométrie collées sur le corps d'épreuve, ce qui a pour effet d'en modifier la résistance électrique. Cette variation de résistance est mesurée par la technique du pont de Wheatstone dans laquelle deux points du circuit électrique sont alimentés avec une tension électrique analogique continue ou périodique, et une tension analogique variable en fonction de la force appliquée au dynamomètre est recueillie entre deux autres points du circuit.

L'équipement nécessaire pour fournir la tension d'alimentation, recueillir et traiter le signal de sortie et afficher des valeurs utilisables constitue l'électronique associée au capteur. Pour cela, des instruments électriques classiques - alimentation stabilisée et multimètre – peuvent être utilisés. Les constructeurs de capteurs ont développé des **équipements électroniques spécifiques** permettant d'optimiser les réglages, les conditions de mesure et leur précision, et désignés par : pont de mesure, conditionneur, compensateur numérique...etc.

Les derniers progrès dans la technique des dynamomètres consistent à intégrer au capteur l'équipement électronique associé à une numérisation du signal de façon à constituer un seul ensemble qui alimenté en 220 V délivre un **signal de sortie numérique** fonction de la force appliquée au capteur.

Les dynamomètres sont souvent utilisés comme élément sensible des **instruments de pesage**. Dans ce cas, la forme du corps d'épreuve est définie de façon à obtenir un signal de sortie rigoureusement proportionnel à la masse du corps placé sur le plateau récepteur de l'instrument.

### CARACTERISTIQUES NOMINALES DES CAPTEURS DE FORCE

La très grande majorité des capteurs de force utilisant des jauges d'extensométrie comme élément détecteur, ceci leur confère un ensemble de caractéristiques nominales et métrologiques. Ces dernières sont présentées dans la partie relative à l'étalonnage des dynamomètres. Les principales caractéristiques nominales définies en rapport avec l'utilisation du capteur, sont les suivantes.

#### Forces appliquées

- la **force nominale d'utilisation** est celle qui correspond à l'utilisation normale du capteur. Un dépassement de 10% de cette charge doit conserver la validité de l'étalonnage.
- la **force maximale sans détérioration** est celle que peut recevoir le capteur sans altérer de façon définitive sa capacité à mesurer des forces. Pour cette charge la conservation des résultats de l'étalonnage n'est pas garantie. Elle est souvent de l'ordre de 130% de la charge nominale d'utilisation.
- la **force de rupture** est celle qui entraîne la rupture du corps d'épreuve sous l'action d'une contrainte supérieure à la contrainte maximale admissible par le matériau constitutif du corps d'épreuve

## Sensibilité

La **sensibilité** du capteur est le rapport de la tension délivrée par le capteur sur la tension qui l'alimente, le capteur étant chargé à la force nominale d'utilisation. Elle s'exprime en mV/V. Cette valeur traduit la contrainte maximale appliquée au corps d'épreuve. Moins la sensibilité est élevée, plus faible est le niveau des contraintes appliquées au capteur et mieux sont conservées ses caractéristiques métrologiques. Les valeurs de sensibilité se situent généralement entre 1,5 et 4 mV/V. Un capteur linéaire se traduit par une sensibilité constante. Pour ce faire, le corps d'épreuve doit avoir des caractéristiques particulières que ne possède pas un simple barreau cylindrique qui engendre des contraintes légèrement non-linéaires.

## Influence de la température

La température influe sur les principaux éléments constitutifs d'un capteur de force :

- sur le corps d'épreuve en modifiant son élasticité. Cette variation est en valeur relative de l'ordre de 0,1% par degré pour les aciers.
- sur les jauges d'extensométrie en modifiant leur résistance électrique.

L'influence de la température peut être réduite en ajoutant aux jauges d'extensométrie des composants qui induisent dans le circuit de mesure une variation opposée à celle due à la température. Il est possible de cette façon de réduire cette influence d'un facteur supérieur à 5. Mais ces compensations ne sont généralement efficaces que sur un domaine de température donné. C'est pourquoi plusieurs domaines de température sont à considérer. la température de référence est celle pour laquelle les caractéristiques métrologiques du capteur sont établies. Celle-ci est actuellement définie à 20 °C comme pour l'ensemble de la métrologie mécanique.

- La **plage de température compensée** sur laquelle les caractéristiques du capteur sont effectivement obtenues
- La **plage de température opérationnelle** sur laquelle le capteur peut être utilisé mais sans garantie du respect des caractéristiques métrologiques du capteur mais sans perte de ses caractéristiques nominales.
- La **plage de température de stockage** en dehors de laquelle il y a un risque avéré de perte définitive des caractéristiques nominales du capteur.

Au final, l'influence de la température sur le capteur se traduit par 2 coefficients :

- le **coefficient de température sur la sensibilité** du capteur qui caractérise la variation de la sensibilité du capteur en fonction de la température. Il s'exprime en % de la valeur mesurée et par °C.
- le **coefficient de température sur le zéro** qui caractérise la variation du signal délivré par le capteur au repos sous l'influence de la température. Il s'exprime en % de l'étendue de mesure du capteur et par °C.

## Mesures à l'aide d'un dynamomètre

Les dynamomètres peuvent être utilisés pour mesurer une force uni-axiale ou un système de force comprenant plusieurs composantes. De tels systèmes sont réalisés soit par l'association de plusieurs capteurs mono-composantes dans une structure définie à cet effet, soit à l'aide d'un corps d'épreuve d'un type particulier sensible aux différentes composantes d'effort à mesurer et capable de mesurer tout ou partie du torseur des forces en un point.

La mesure de très grandes forces peut être réalisée par l'association en parallèle de plusieurs capteurs mono-composante, l'utilisation de trois capteurs permettant de réaliser l'isostatisme. Les montages

mécaniques pour réaliser de tels systèmes, souvent appelés **pyramides de capteurs**, nécessitent le respect d'exigences particulières.

La vérification des machines d'essai du béton prévoit l'emploi d'un capteur de force très particulier appelé **cylindre de déformation**.

Seules les mesures à l'aide d'un **capteur mono-composante** sont analysées.

La mesure d'une force nécessite de déterminer au préalable deux des caractéristiques de cette force qui sont sa direction et son point d'application. Par ailleurs il convient de définir les précautions à prendre pour que l'utilisation du dynamomètre ne modifie pas le caractère uni-axial de cette force en introduisant des composantes parasites. En particulier les pièces mécaniques qui permettent de transmettre la force à mesurer au capteur doivent assurer un filtrage des efforts parasites et ne doivent pas elles-mêmes en être la cause. La précision de mesure est conditionnée directement par ces pièces de liaison.

L'utilisation d'un capteur de force exige que soit connu son **axe d'effort**, c'est-à-dire l'axe dans lequel la force doit être appliquée au corps d'épreuve. Cet axe doit être matérialisé par des éléments mécaniques accessibles.

Deux configurations sont à distinguer selon que le capteur mesure des forces en traction ou en compression.

#### Traction

L'axe d'effort du capteur est matérialisé en général par les axes des deux **filetages** ou **taraudages** qui terminent ses extrémités. Ceux-ci doivent être co-linéaires et permettre une liaison aisée et d'une bonne qualité mécanique avec la structure qui applique la charge au capteur et celle qui le soutient. La meilleure solution consiste à utiliser des filetages conformes aux normes ISO - de préférence dans la première série des pas fins comme par exemple M 110x4 / M 64x4 / M 52x3 / M 30x2 / M20x1,5 / M12x1,75 - et réalisés avec des tolérances géométriques d'ajustement serrées de type 4h et 4H afin de limiter au minimum le jeu avec les pièces de fixation.

La seconde exigence consiste à supprimer l'influence des forces et couples parasites sur la mesure effectuée dans l'axe du capteur. Lorsque le capteur est muni à ses extrémités de deux filetages, ceci est réalisé aisément à l'aide de 2 **embouts à rotule radiale** fixés de part et d'autre du capteur. Ces rotules définissent deux centres de rotation qui ne laissent passer que les forces exercées sur l'axe reliant ces deux centres. Sous réserve que ces embouts soient en bon état et montés sur le capteur avec un jeu mécanique réduit, ils assurent un découplage tel qu'ils affranchissent de ce qui se passe au-delà des rotules et permettent d'améliorer d'un facteur 10 les mesures effectuées. Pour les très grandes charges, l'utilisation de rotules radiales s'avère impossible et dans ce cas il faut prendre des précautions particulières pour assurer que la force à mesurer est bien uni-axiale et passe par l'axe d'effort du capteur et la précision des mesures effectuées est en général moins bonne.

#### Compression

Trois difficultés essentielles se présentent : la matérialisation de l'axe d'effort du capteur, la surface de contact qui permet l'application de la force à mesurer au capteur, l'effet de la réaction de la structure sur le capteur.

La matérialisation de l'**axe d'effort** d'un capteur de compression est moins évidente que celle d'un capteur de traction. Si le capteur présente une base plane munie en son centre d'un alésage de bonne qualité mécanique centré sur l'axe géométrique du corps d'épreuve, il est admis que l'axe d'effort du capteur est la perpendiculaire à sa face inférieure passant par le centre de cet alésage. Et dans ce cas, le point d'application

de la force à mesurer sur la face opposée du capteur doit se situer sur cet axe. L'alésage sur la face inférieure peut être remplacé par un usinage précis du diamètre extérieur de cette face lorsqu'elle est cylindrique.

Compte tenu de la résistance des matériaux, l'application au capteur de la force à mesurer ne peut bien évidemment pas être assurée en un point. Une surface de contact est nécessaire. Cette surface doit être la plus réduite possible et éviter autant que possible la génération et la transmission de forces et couples parasites. La meilleure solution consiste à terminer l'extrémité du corps d'épreuve du capteur par une **calotte sphérique** sur laquelle est posée une **pièce d'appui** plane. Ce système réalise un découplage très efficace. La principale difficulté tient au choix du rayon de la calotte sphérique et aux caractéristiques mécaniques de la pièce d'appui, en particulier sa résistance à la compression et sa dureté. En dehors de l'application de la force, le contact avec le capteur se réduit à un point qui lors de l'application de la force devient une surface, ce processus étant réversible. Hormis sa caractéristique de surface, la géométrie de la pièce d'appui doit permettre un positionnement précis de celle-ci sur la structure engendrant la force à mesurer. Lorsque le capteur n'est pas muni d'une tête sphérique, il est généralement possible d'en rapporter une de dimensions appropriées et dont les conditions de montage doivent être définies.

Les capteurs de compression de très forte capacité sont parfois équipés à leur sommet de rotules axiales de très grand rayon. Si de tels équipements sont utiles pour limiter l'influence du non parallélisme de surfaces en regard, elles ne permettent pas en revanche d'assurer un réel filtrage des efforts parasites.

Selon les lois et principes de la mécanique, la face inférieure d'un capteur de compression posé sur une surface reçoit de la part de celle-ci une force égale et opposée à celle appliquée au sommet du capteur. Ce point est souvent négligé et cause de nombreuses erreurs de mesures. L'appui du capteur de compression conditionne très fortement les contraintes induites dans le corps d'épreuve et utilisées pour la mesure de la force appliquée au capteur. Le capteur doit être posé sur une base en contact avec la totalité de sa surface d'appui. Cette pièce doit être parfaitement plane et aussi rigide possible. La dureté du matériau utilisé doit être du même ordre que celle du capteur. Par ailleurs un positionnement précis du capteur sur cette base permet souvent d'assurer que la force à mesurer passe par l'axe d'effort du capteur. Si le capteur est bridé par des vis sur une **embase** spécifique ou sur la surface d'appui, le couple de serrage de ces vis est à définir et à respecter.