TP : Dimensionner le corps d'épreuve

d'un capteur d'effort

Modéliser les solides déformables de type "poutres droites"

Compétences associées du programme de CPGE PTSI PT:

A – Analyser A3 Comparer qualitativement les caractéristiques physiques des matériaux

A3 Justifier le choix d'un matériau en fonction de ses caractéristiques

B – Modéliser B2 Associer le modèle poutre du solide déformable localement en petites déformations à la géométrie et au comportement d'un solide

B2 Ecrire le torseur des petits déplacements et le torseur des déformations au centre d'inertie d'une section droite

C – Résoudre Déterminer les déplacements le long de la ligne moyenne à partir des déformations

Choisir les paramètres de simulation

Faire varier un paramètre et comparer les courbes obtenues

D – Expérimenter D2 Associer un principe physique à l'acquisition de la grandeur mesurée

D2 Qualifier les caractéristiques d'entrée - sortie d'un capteur

D2 Justifier le choix et les caractéristiques d'un capteur ou d'un appareil de mesure vis-à-vis de la grandeur physique à mesurer

D3 Mettre en œuvre un environnement recréé (par exemple : expérimentation assistée par ordinateur)

E – Concevoir E1 Elaborer des indicateurs de performance relatifs aux fonctions auxquelles participe la pièce

E1 Choisir des couples matériaux/procédés à partir de documents ou de bases de données

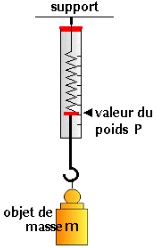
# Objectif

**On s'intéresse dans ce TP aux différents capteurs d'effort ou de couple placés sur les systèmes de la salle de TP. Ces capteurs possèdent souvent des connectiques fragiles, ou des jauges de déformation apparentes pouvant être abîmées par un contact avec le capteur. On propose de reconcevoir un capteur qui apporterait une solution à cette problématique. Le capteur devra être compatible avec le système sur lequel vous travaillez.**

# Principe de la mesure d'effort ou de couple

Le principe d'un capteur d'effort est le suivant :

* On génère des déformations ayant une répartition connue par l'action de l'effort à mesurer sur un **corps d'épreuve (cf ci-contre)**, constitué d'un matériau et d'une géométrie bien connus.
* On mesure les déformations de ce corps d'épreuve en utilisant des jauges de déformation collées en différents points du corps d'épreuve.

*Remarque 1 :* Le principe est similaire à celui d'un dynamomètre à ressort, dans lequel on va mesurer l'intégrale des déformations, donc le déplacement à l'extrémité.

*Remarque 2 :* Mesurer un couple revient à mesurer un effort au bout d'un bras de levier. On ne s'intéressera ici qu'à un capteur d'effort, qui peut donc facilement être converti en capteur de couple.

## Mesure par jauges de déformation : chaîne d'acquisition

### Jauge de déformation :

Une jauge est composée d'un "serpentin" formé par un fil conducteur résistif. Ce fil est intégré à une plaque fine en époxy (isolant) que l'on vient coller sur le corps d'épreuve. La jauge subit une déformation identique à celle de la structure, dans la direction parallèle aux brins. Lors de leur élongation longitudinale, la section des fils diminue (effet Poisson), ce qui engendre une augmentation de leur résistance électrique.

On définit le **facteur de jauge** *k* par la relation : avec et R respectivement la variation de résistance et la résistance initiale de la jauge, et ε la déformation longitudinale (proportionnelle – sans unité) de la jauge. Le facteur de jauge est habituellement de l'ordre de 2 (sans unité).

### Traitement du signal issu de jauges : Pont de Wheatstone

La déformation d'une jauge engendre une variation de résistance très faible. On dispose souvent d'outils permettant la mesure précise de variations de tension, mais plus difficilement de variations de résistance. **Il faut donc transformer la variation de résistance en une variation de tension. C'est le rôle du pont de Wheatstone.**

Le pont de Wheatstone est un montage électrique composé de quatre résistances montées sous la forme de deux ponts diviseurs de tension. Une ou plusieurs d'entre elles peut être une jauge de déformation.

Le pont est alimenté avec une tension constante V, et on mesure la différence de potentiel (ou tension) *e* entre les points A et B.

* + En l'absence de déformations : le pont est équilibré, 🡺 *e=0V*
  + Si déformation, une résistance varie : le pont est déséquilibré 🡺 *e≠0V* (mais faible!)

*Quelques exemples usuels de montages de jauges dans des ponts de Wheatstone sont présentés dans le document ressource DR\_Montage usuels Pont de Wheatstone.pdf*

### Amplification

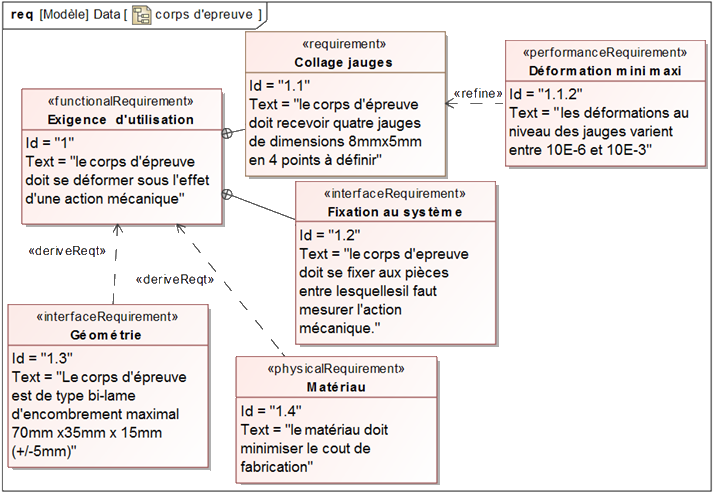
La tension *e* en sortie du pont de Wheatstone est toujours faible et présente également des variations faibles. Pour analyser le signal (à l'aide d'une carte d'acquisition ou d'une carte Arduino par exemple), il est donc nécessaire de l'amplifier. **On utilise donc toujours un amplificateur, parfois appelé conditionneur en sortie de pont de Wheatstone.**

## Corps d'épreuve

Le corps d'épreuve est le support matériel déformable sur lequel les jauges sont collées. Ce corps d’épreuve possède une géométrie particulière permettant de maitriser théoriquement la relation entre les déformations en tout point du corps d’épreuve (mesurées par les jauges de déformation) et l’effort appliqué. **Nous allons ici nous intéresser au dimensionnement de ce corps d'épreuve. On utilisera la théorie des poutres et le calcul par éléments finis pour le dimensionnement.**

# Conception d'un corps d'épreuve

## Cahier des charges

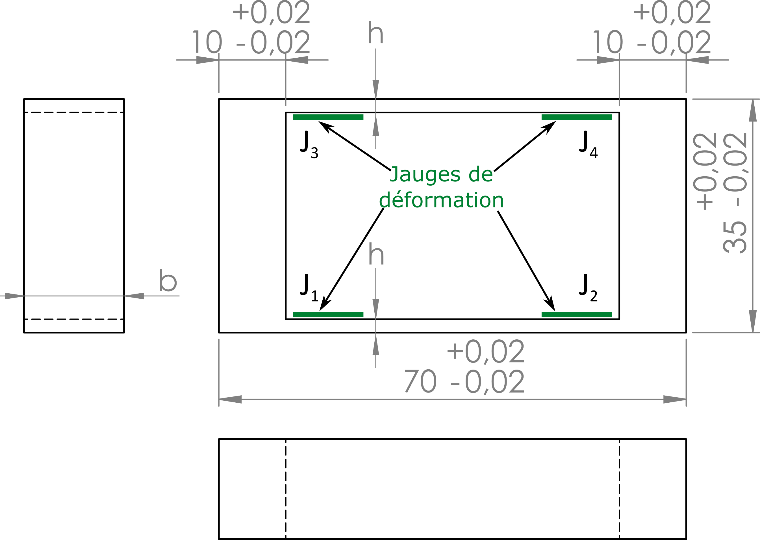
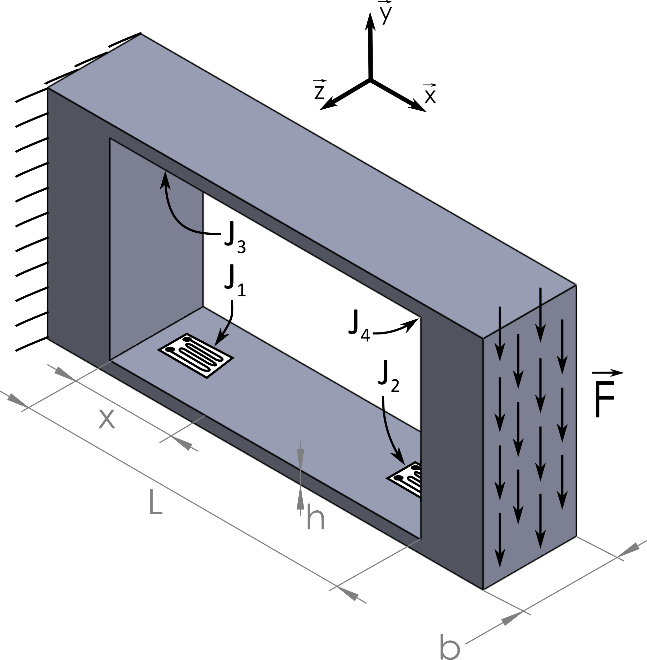


On note que l'exigence 1.1.2 correspond à une plage de variation de la déformation au niveau des jauges, qui garantit une plage de mesure et une résolution suffisante au capteur.

*Exigences associées au système sur lequel vous travaillez :*

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Capteur e-bike | Capteur cordeuse | Capteur ouvre portail | Capteur capsuleuse |
| Effort maximal à mesurer | [0 à 300N] | [0 à 500N] | [0 à 2500N] | [0 à 150N] |
| Résolution du capteur | 0,5 N | 1 N | 5 N | 0,5 N |

## Géométrie du corps d'épreuve

La géométrie du corps d'épreuve à étudier est imposée. **Seules les dimensions *h* et *b* pourront être choisies.** On choisira **initialement *b=15mm***, puis on le fera évoluer si nécessaire. On pourra également ajouter si nécessaire des congés dans les angles, un système de fixation du corps d'épreuve, etc.

## Matériau du corps d'épreuve

Chaque personne du groupe de TP étudiera un matériau de la liste suivante :

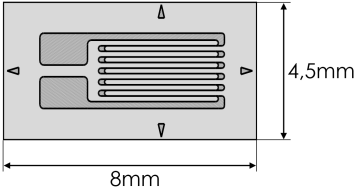
|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Matériau | Module d'Young E | Limite élastique Re | Procédé d'obtention |
| Acier 1023: tôle d'acier au carbone (SS) | 205 000 MPa | 283 MPa | usiné |
| Alliage d'aluminium: 1060 | 69 000 MPa | 70 MPa | usiné |
| Thermoplastique: PMMA (Plexiglas) | 2 770 MPa | 60 MPa | découpé |
| Polymère biodégradable à base d'amidon de maïs: PLA | 2 000 MPa | 30 MPa | imprimé par FDM |

Pour le PLA, on utilisera un ABS, de propriétés proches, dans SolidWorks.

On adoptera un **coefficient de sécurité s=1,05**.

## Contraintes imposées par l'utilisation de jauges

* La déformation longitudinale maximale que peut supporter une jauge de déformation standard est : **max= 10-3** . Elle conditionne la plage de mesure du capteur.
* La déformation longitudinale minimale que peut percevoir une jauge de déformation standard est**min= 10-6**. Elle conditionne la résolution du capteur.



* Les dimensions des jauges de déformation sont données sur la figure suivante. La direction dans laquelle les contraintes sont mesurées est la plus grande. On considérera que la jauge mesure la déformation en son centre.

# Analyser la chaîne d'acquisition

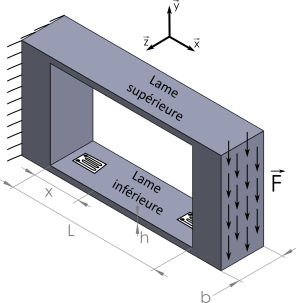
1. Identifier le capteur d'effort à jauges de déformation sur le système étudié, et suivre les fils pour voir à quels éléments il est connecté. Quel effort mesure-t-il?

Sur le diagramme des exigences donné sur le document réponse, indiquer le nom des objets techniques qui réalisent les exigences (jauge de déformation, logiciel de traitement du signal, corps d'épreuve, pont de Wheatstone).

Sur le diagramme de blocs internes donné en document réponse, indiquer les grandeurs physiques qui transitent par les objets techniques ( [m/m], tension [V], nombre binaire, force [N]) en précisant la nature de l'information: Analogique, Numérique discrète, Tout ou rien (TOR).

# Concevoir et dimensionner la géométrie du corps d'épreuve

Le corps d'épreuve peut être considéré comme l'association de deux "poutres" encaissant chacune la moitié des actions mécaniques appliquées sur le corps d'épreuve. Par conséquent, la modélisation de type "poutre" des lames du capteur  s'apparente au modèle hyperstatique donné ci-contre : la poutre est encastrée d'un côté, et reçoit un effort de l'autre. Mais comme la poutre ne peut pas tourner en son extrémité à cause de la géométrie (), la résolution du problème hyperstatique montre qu'on applique également à cet endroit un moment égal à .



**L**

**O**

**A**

## Prédimensionnement en utilisant la théorie des poutres

On utilise souvent la théorie des poutres pour effectuer un prédimensionnement, c’est-à-dire déterminer les dimensions approximatives de la structure. Pour cela, une feuille de calcul Excel intégrant une modélisation par la théorie des poutres vous est proposée. Les tracés et formules y sont déjà saisis. Il vous reste à l'exploiter pour déterminer les dimensions du capteur considéré.

* Ouvrir le fichier "RDM corps d epreuve.xlsx" disponible dans le dossier du TP.
* Analyser les différentes colonnes du tableur (les lignes correspondent à l'abscisse du point G, centre d'une section qui se déplace le long de la poutre) :
  + Fmax désigne l'effort maximal que l'on doit pouvoir mesurer avec le capteur
  + Fmin désigne la variation d'effort minimale que le capteur doit pouvoir détecter

### Détermination de h pour éviter un endommagement du capteur

On s'impose pour l’instant, et pour tout le TP (les dimensions extérieures du capteur sont imposées à 70 x 35 x 15 mm au maximum).

**Exigence 1 : Aucun point de la "poutre" ne subit une contrainte supérieure à la limite élastique du matériau sous l'effet de l'effort maximal Fmax.**

1. Sachant que les lames travaillent en flexion, écrire sur votre copie le critère de résistance permettant d'assurer le non endommagement du capteur. Vous donnerez une expression en fonction de Re, s (coef. de sécurité), Mfmax (moment fléchissant maximal), h, b et justifierez votre raisonnement.
2. La contrainte à comparer à Re/s (critère de résistance) est déjà saisie dans la colonne E du tableur. En saisissant les données associées au capteur que vous étudiez (géométrie, matériau, efforts à mesurer), déterminer à l'aide du tableur la hauteur hmin qui permet de valider l'Exigence 1. Noter cette valeur, elle vous servira pour la suite!

### Détermination de l'emplacement de collage des jauges de déformation

**Exigence 2 : Les jauges ne doivent pas subir de déformation supérieure à 10-3 (non détérioration de la jauge), mais leur déformation doit s'approcher le plus possible de cette valeur lorsque le capteur est soumis à l'effort maximal, pour optimiser la sensibilité du capteur.**

*Remarque :* On notera que le placement des jauges est symétrique sur une même poutre, et est identique sur les deux poutres du corps d'épreuve. Il suffit donc de déterminer l'emplacement d'une des jauges pour en déduire celui des autres.

1. En utilisant la colonne du tableur associée à l'exigence 2, déterminer à quelle abscisse x il serait optimal de placer les jauges pour optimiser la sensibilité du capteur.
2. L'abscisse x obtenue est-elle compatible avec les dimensions des jauges (les jauges ne sont pas ponctuelles en réalité!)? Si oui, dessiner le corps d'épreuve à l'échelle sur votre copie en plaçant les jauges à l'emplacement choisi. Si non, choisir en argumentant à quel endroit placer les jauges, puis dessiner le corps d'épreuve comme demandé ci-dessus.

**Exigence 3 : Les jauges doivent subir une déformation supérieure à 10-6 lorsque l'effort minimal perceptible est appliqué, ce qui assure une résolution satisfaisante au capteur.**

1. En utilisant la colonne du tableur associée à l'exigence 3, vérifier que la déformation sous l'effort minimal perceptible par la jauge (placée dans la position choisir en question 5) est supérieure à 10-6. Expliquer pourquoi une déformation inférieure à cette valeur empêche la détection de l'effort correspondant à la résolution du capteur.

### Déplacement en bout de capteur sous l'effort maximal

La déformée d'une des poutres du capteur est donnée sur le graphique représenté en vert.

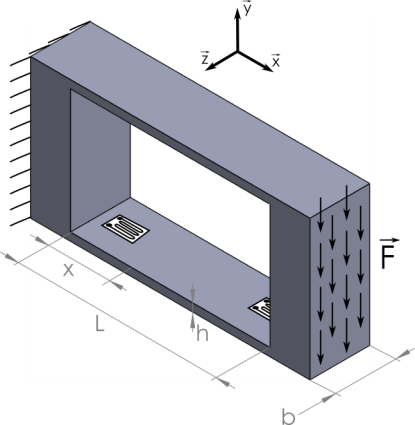
1. Quel est le déplacement maximal en bout de capteur, sous l'effet de l'effort maximal admissible par le capteur? Cette valeur vous paraît-elle importante ou négligeable pour le fonctionnement du système étudié?

## Validation de la géométrie par calcul par éléments finis

Nous allons maintenant valider le prédimensionnement précédent en utilisant un modèle numérique par éléments finis. Cette étude peut être réalisée avec les logiciels OpenSource Onshape et Simscale en se référant au lien suivant :

https://www.simscale.com/projects/cbellier/corps\_d-epreuve/

La suite du TP utilise le logiciel SolidWorks, associé au module Simulation.

* Ouvrir le fichier "capteur effort commun.sldprt" dans SolidWorks. Le sauvegarder dans votre dossier personnel.
* Modifier la géométrie existante pour la mettre aux dimensions (*b* et *h*) choisies en début de TP.
* Démarrer une étude statique en cliquant sur l'onglet Simulation, puis configurer une "nouvelle étude".
* Appliquer le matériau étudié (celui que vous avez utilisé dans le tableur Excel), ainsi qu'une condition limite en déplacement ("Géométrie fixe" au niveau de l'encastrement) et l'effort maximal F ("Force" suivant une "direction sélectionnée"), comme décrit sur la figure ci-contre.
* Faire un clic droit sur Maillage, et sélectionner "Créer le maillage". Choisir un maillage fin pour améliorer la précision des résultats.
* Exécuter le calcul puis afficher les contraintes de Von Mises obtenues.

1. La contrainte maximale obtenue par le calcul par éléments finis correspond-t-elle à celle obtenue par la théorie des poutres? Quantifier l'écart observé par un pourcentage.
2. La contrainte maximale obtenue est-elle inférieure au rapport du matériau considéré? Selon vous, à quelle forme de la pièce est dû l'éventuel dépassement de la contrainte admissible par le matériau?
3. Proposer une légère évolution de la pièce (sans modifier les grandeurs h et b), afin de ne pas dépasser la contrainte admissible Re/s. Modifier la pièce (en cliquant sur l'onglet "Modèle" au bas de l'écran), puis relancer une simulation pour voir si les contraintes sont maintenant satisfaisantes. Renouveler l'opération jusqu'à obtenir un résultat satisfaisant.

* Faire un clic droit sur le résultat "Déformation", et cliquer sur "Modifier la définition". Sélectionner comme contrainte à tracer "EPSX : Déformation normale X" qui correspond à la déformation obtenue par la théorie des poutres.

1. D'après ces résultats, quelle est la déformation atteinte sous l'effort maximal à l'endroit où sont collées les jauges de déformation? Cette valeur est-elle en accord avec celle obtenue avec la théorie des poutres?

# Valider le choix de matériau

On souhaite maintenant vérifier que le matériau choisi est bien adapté, et qu'il n'en existe pas un autre, de propriétés proches, qui serait compatible avec la géométrie de corps d'épreuve choisie précédemment.

Module d'Young associé aux exigences 2 et 3

L'expression de la déformation maximale dans la section d'abscisse contenant une jauge est la suivante :

Or on impose, lors de la variation de l'effort maximal applicable au capteur () à l'effort minimal détectable par le capteur (), que .

On en déduit un encadrement du module d'Young du capteur :

Avec et

1. Calculer dans le cas de votre capteur les bornes de l'encadrement du module d'Young en utilisant la formule ci-dessus. Le matériau choisi jusqu'alors satisfait-il ce critère?

### Limite élastique associée à l'exigence 1

La contrainte maximale dans la poutre est obtenue en et est telle que :

On en déduit que

1. Calculer dans le cas de votre capteur la valeur minimale de .

### Validation du choix de matériau avec CES Edupack

* Ouvrir le logiciel CES Edupack, et choisir "Niveau 2". Cliquer sur Sélectionner et choisir "Univers des Matériaux 🡪 Edu Niveau 2".
* Définir une étape de sélection de type limite pour imposer les valeurs limites de E et de Re obtenues aux questions 12 et 13.
* Créer une autre étape de sélection de type Graphique, et imposer en abscisse la limite élastique Re, et en ordonnée le module d'Young E.
* Cliquer sur l'outil "Intersection des résultats"  pour cacher les matériaux du graphe qui ne répondent pas aux premières étapes de sélection.

*Proposition de critères de choix :*

- Si on veut utiliser le capteur dans toute sa plage de mesure (meilleure résolution), il faut **minimiser E dans la plage sélectionnée**.

- Si on veut maximiser la résistance aux éventuels chocs ou dépassements ponctuels de l'effort maximal admissible par le capteur, il faut **maximiser Re**.

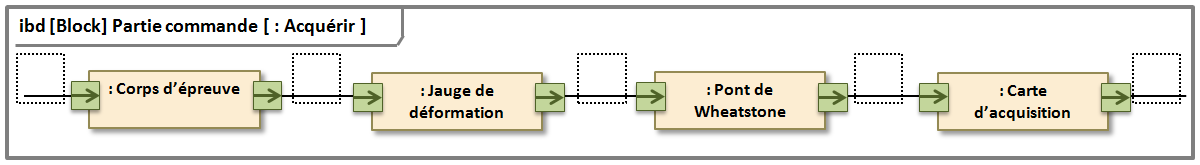
1. D'après le graphique obtenu, quel est le matériau le plus adapté au respect de tous les critères précédents? Situez le matériau que vous avez considéré jusqu'alors. Comment se place-t-il par rapport au matériau optimal? Il y a-t-il d'autres critères qui entrent en compte lors du choix d'un matériau?
2. Quel matériau proposez-vous au final pour la réalisation du nouveau corps d'épreuve? Argumentez votre choix.

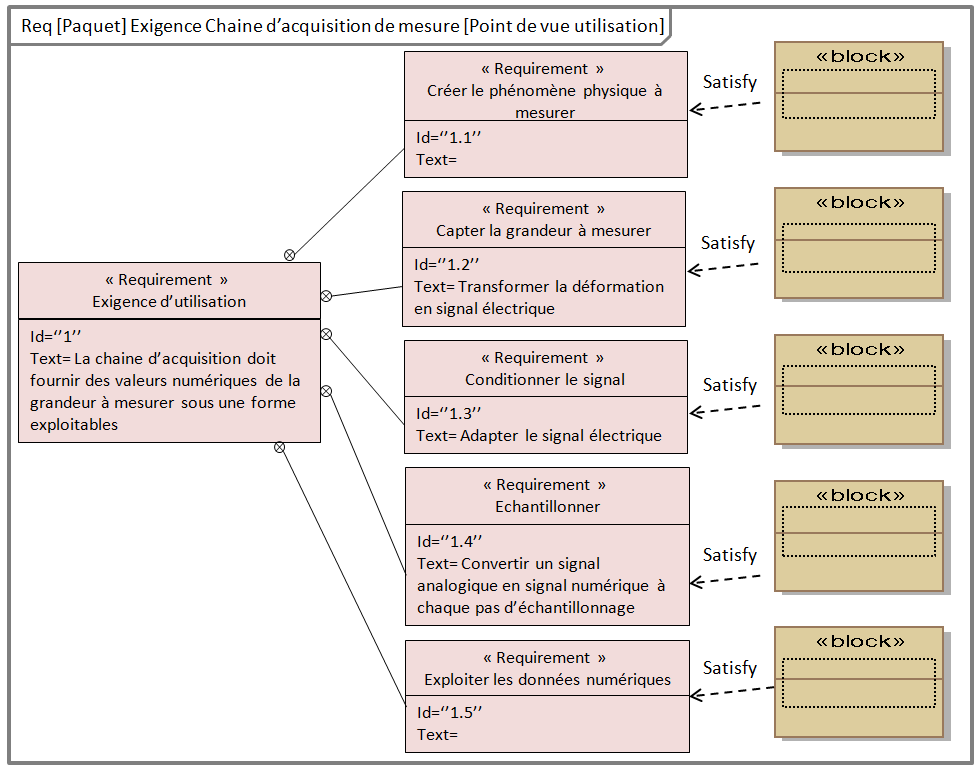
Nom : Système étudié : Matériau étudié :

Documents réponses

## Analyser la chaîne d'acquisition

|  |
| --- |
| Q1 : Effort mesuré : |





## Concevoir et dimensionner la géométrie du corps d'épreuve

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Q2 : Critère de résistance | | Q3 : |
| Q4 : optimal et déformation associée | | Q5 : choisi (à cause de la dimension des jauges) |
| Q5 (suite) : Dessin à l'échelle du capteur avec l'emplacement des jauges | | |
| Q6 : Déformation de la jauge sous effort mini  Explication : | Q7 : Déplacement maxi en bout de capteur  Valeur importante ou négligeable? | |
| Q8 : Contrainte maxi issue du calcul EF  Ecart par rapport à la théorie des poutres : | Q9 : Contrainte maximale supérieure à *Re/s*?  Pourquoi? | |
| Q10 : Evolution de forme proposée  Dimensions optimales obtenues : | Q11 : Déformation à sous les jauges  Valeur en accord avec la théorie des poutres? | |

## Valider le choix de matériau

|  |  |
| --- | --- |
| Q12 : Bornes d'encadrement de E  <E<  Le matériau choisi satisfait-il ce critère? | Q13 : Valeur minimale de Re |
| Q14 : Matériau le plus adapté  Situation du matériau considéré, autres critères de choix | Q15 : Matériau choisi  Justification du choix |