

TP : DIMENSIONNER LE CORPS D'EPREUVE 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 tenseur des petits déplacements et le tenseur 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

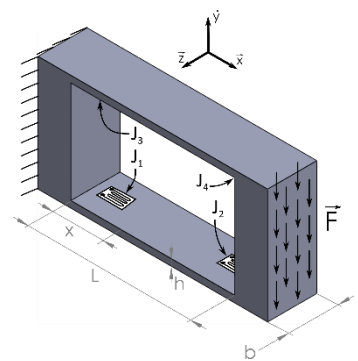
OBJECTIF

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

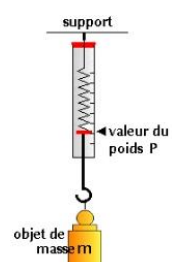
Le principe d'un capteur d'effort est le suivant :

- 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 J_i 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.

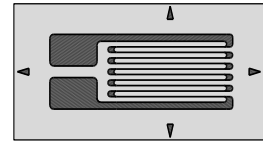
Remarque 2 : Mesurer un couple revient à mesurer un effort au bout d'un bras de levier. On ne s'intéressera ici qu'à un capteur d'effort, qui peut donc facilement être converti en capteur de couple.



MESURE PAR JAUGES DE DEFORMATION : CHAÎNE D'ACQUISITION

JAUGE DE DEFORMATION :

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.

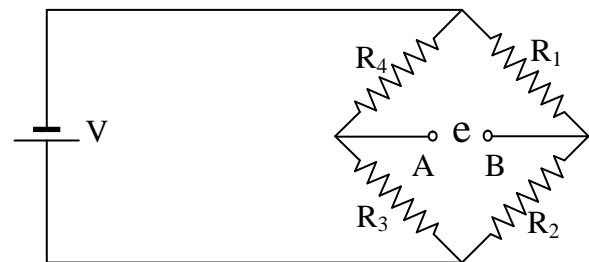


On définit le **facteur de jauge** k par la relation : $\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon$ avec ΔR et R respectivement la variation de résistance et la résistance initiale de la jauge, et ε la déformation longitudinale (proportionnelle – sans unité) de la jauge. Le facteur de jauge est habituellement 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, $R_1 R_3 = R_2 R_4 \rightarrow e=0V$
- Si déformation, une résistance varie : le pont est déséquilibré $\rightarrow e \neq 0V$ (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

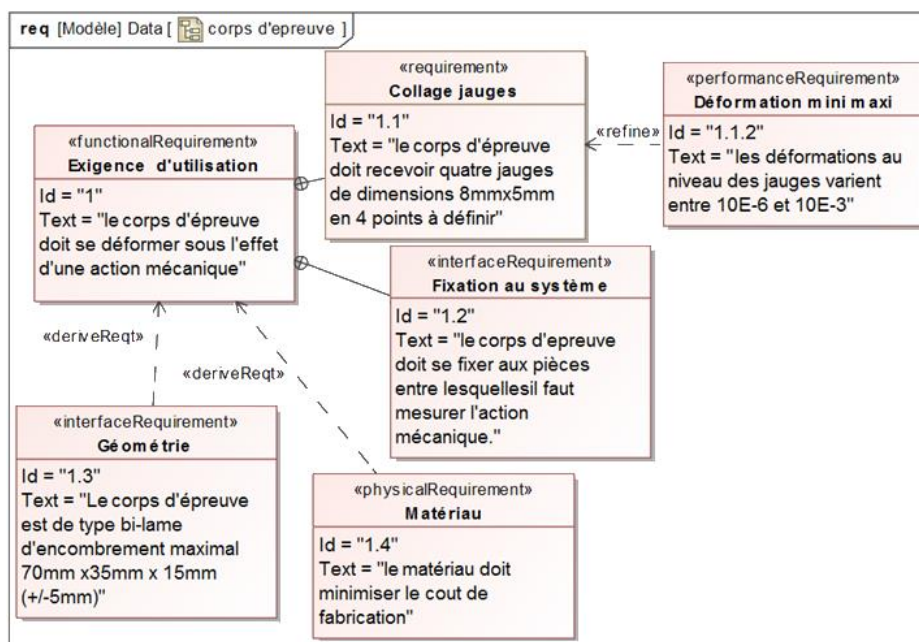
La tension e en sortie du pont de Wheatstone est toujours faible et présente également des variations faibles. Pour analyser le signal (à l'aide d'une carte d'acquisition ou d'une carte Arduino par exemple), il est donc nécessaire de l'amplifier. **On utilise donc toujours un amplificateur, parfois appelé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

CAHIER DES CHARGES



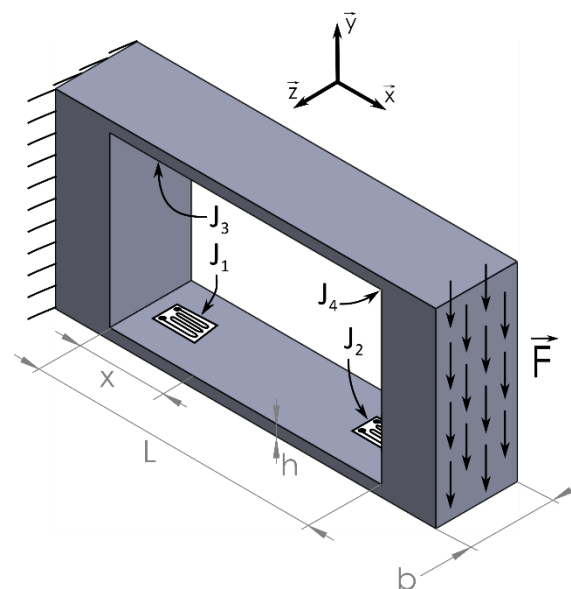
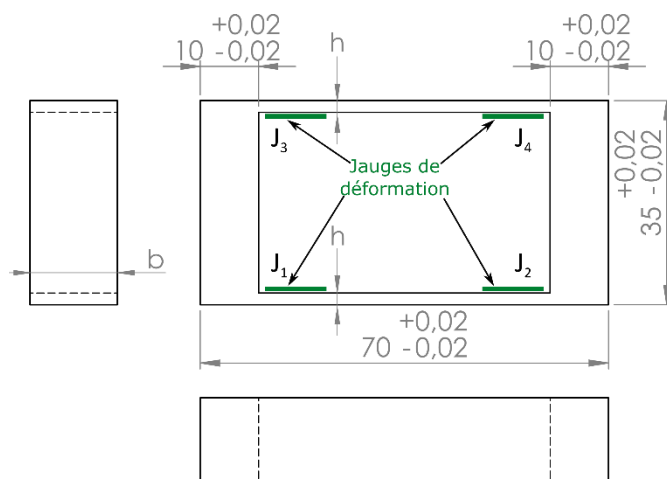
On note que l'exigence 1.1.2 correspond à une plage de variation de la déformation au niveau des jauges, qui garantit une plage de mesure et une résolution suffisante au capteur.

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

GEOMETRIE DU CORPS D'EPREUVE

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.



MATERIAU DU CORPS D'EPREUVE

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

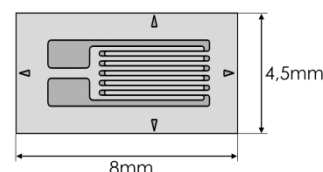
Matériau	Module d'Young E	Limite élastique Re	Procédé d'obtention
Acier 1023: tôle d'acier au carbone (SS)	205 000 MPa	283 MPa	usiné
Alliage d'aluminium: 1060	69 000 MPa	70 MPa	usiné
Thermoplastique: PMMA (Plexiglas)	2 770 MPa	60 MPa	découpé
Polymère biodégradable à base d'amidon de maïs: PLA	2 000 MPa	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 IMPOSEES PAR L'UTILISATION DE JAUGES

- La déformation longitudinale maximale que peut supporter une jauge de déformation standard est : $\epsilon_{\max} = 10^{-3}$. Elle conditionne la plage de mesure du capteur.
- La déformation longitudinale minimale que peut percevoir une jauge de déformation standard est: $\epsilon_{\min} = 10^{-6}$. 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 CHAINE D'ACQUISITION

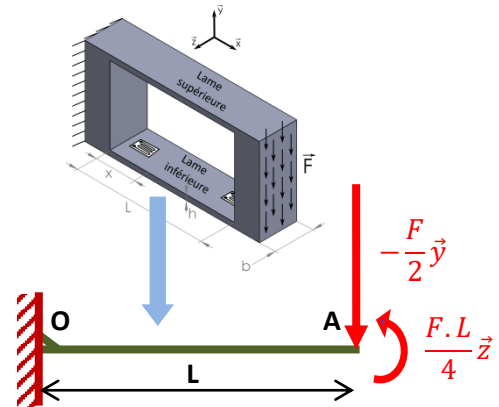
Q1. Identifier le capteur d'effort à jauges de déformation sur le système étudié, et suivre les fils pour voir à quels éléments il est connecté. Quel effort mesure-t-il?

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 (ϵ [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 GEOMETRIE DU CORPS D'EPREUVE

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 $F/2$ de l'autre. Mais comme la poutre ne peut pas tourner en son extrémité à cause de la géométrie ($y'(L) = 0$), la résolution du problème hyperstatique montre qu'on applique également à cet endroit un moment égal à $F \cdot L/4$.



PREDIMENSIONNEMENT EN UTILISANT LA THEORIE 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 x du point G, centre d'une section qui se déplace le long de la poutre) :
 - F_{max} désigne l'effort maximal que l'on doit pouvoir mesurer avec le capteur
 - F_{min} désigne la variation d'effort minimale que le capteur doit pouvoir détecter

DETERMINATION DE H POUR EVITER UN ENDOMMAGEMENT DU CAPTEUR

On s'impose pour l'instant $b = 15mm$, et $L = 50mm$ pour tout le TP (les dimensions extérieures du capteur sont imposées à $70 \times 35 \times 15$ 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 F_{max} .

- Q2. 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 R_e , s (coef. de sécurité), M_{fmax} (moment fléchissant maximal), h , b et justifierez votre raisonnement.
- Q3. La contrainte à comparer à R_e/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 h_{min} qui permet de valider l'Exigence 1. Noter cette valeur, elle vous servira pour la suite!

DETERMINATION DE L'EMPLACEMENT DE COLLAGE DES JAUGES DE DEFORMATION

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.

- Q4. 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.
- Q5. 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.

- Q6. 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 choisie 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.

DEPLACEMENT EN BOUT DE CAPTEUR SOUS L'EFFORT MAXIMAL

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

- Q7. 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?

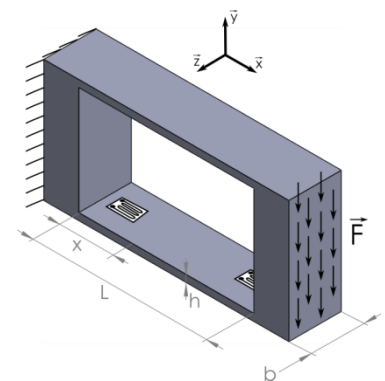
VALIDATION DE LA GEOMETRIE PAR CALCUL PAR ELEMENTS FINIS

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.



- Q8. La contrainte maximale obtenue par le calcul par éléments finis correspond-elle à celle obtenue par la théorie des poutres? Quantifier l'écart observé par un pourcentage.

- Q9. La contrainte maximale obtenue est-elle inférieure au rapport Re/s du matériau considéré? Selon vous, à quelle forme de la pièce est dû l'éventuel dépassement de la contrainte admissible par le matériau?
- Q10. 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.
- Q11. 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 MATERIAU

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 ASSOCIE AUX EXIGENCES 2 ET 3

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

$$\varepsilon_{jauge} = \frac{3.F.(L-2.x_j)}{2.E.b.h^2}$$

Or on impose, lors de la variation de l'effort maximal applicable au capteur (F_{max}) à l'effort minimal détectable par le capteur (F_{min}), que $10^{-6} < \varepsilon_{jauge} < 10^{-3}$.

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

$$\frac{3.F_{max} \cdot (L - 2.x_j)}{2.b.h^2 \cdot \varepsilon_{max}} < E < \frac{3.F_{min} \cdot (L - 2.x_j)}{2.b.h^2 \cdot \varepsilon_{min}}$$

$$\text{Avec } \varepsilon_{min} = 10^{-6} \text{ et } \varepsilon_{max} = 10^{-3}$$

- Q12. 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 ELASTIQUE ASSOCIEE A L'EXIGENCE 1

La contrainte maximale dans la poutre est obtenue en $x = 0$ et est telle que :

$$\sigma_{max} = \frac{3.F.L}{2.b.h^2} < \frac{Re}{s}$$


On en déduit que

$$Re > \frac{3.F.L.s}{2.b.h^2}$$

- Q13. Calculer dans le cas de votre capteur la valeur minimale de Re .

VALIDATION DU CHOIX DE MATERIAU 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** .

- Q14. *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?*
- Q15. *Quel matériau proposez-vous au final pour la réalisation du nouveau corps d'épreuve? Argumentez votre choix.*

Nom :

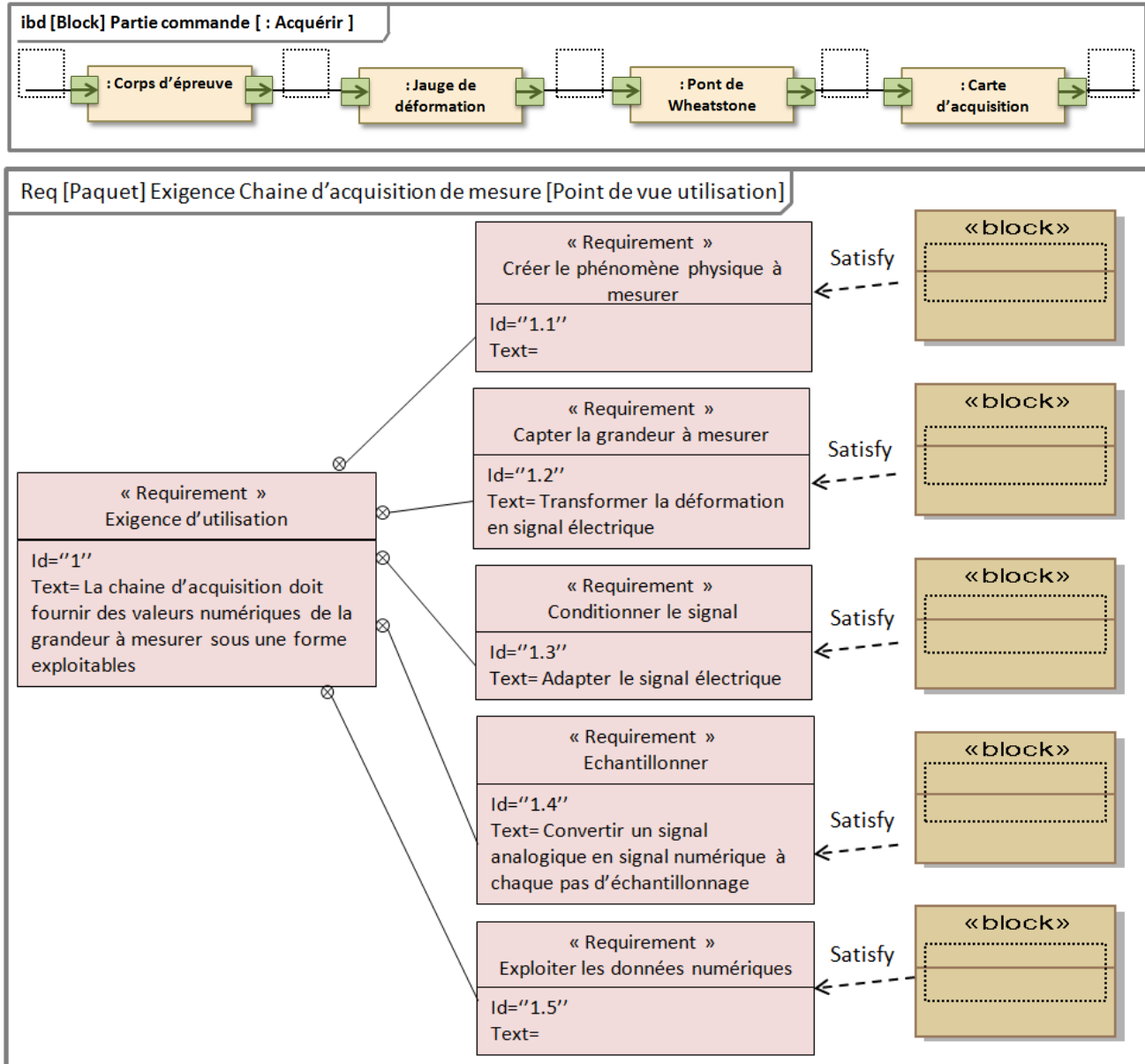
Système étudié :

Matériau étudié :

DOCUMENTS REPONSES

ANALYSER LA CHAÎNE D'ACQUISITION

Q1 : Effort mesuré :



CONCEVOIR ET DIMENSIONNER LA GEOMETRIE DU CORPS D'EPREUVE

Q2 : Critère de résistance	Q3 : h_{min}
Q4 : x_{jauge} optimal et déformation associée	Q5 : x_{jauge} 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 $R_{e/s}$? Pourquoi?
Q10 : Evolution de forme proposée Dimensions optimales obtenues :	Q11 : Déformation à F_{max} sous les jauges Valeur en accord avec la théorie des poutres?

VALIDER LE CHOIX DE MATERIAU

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