

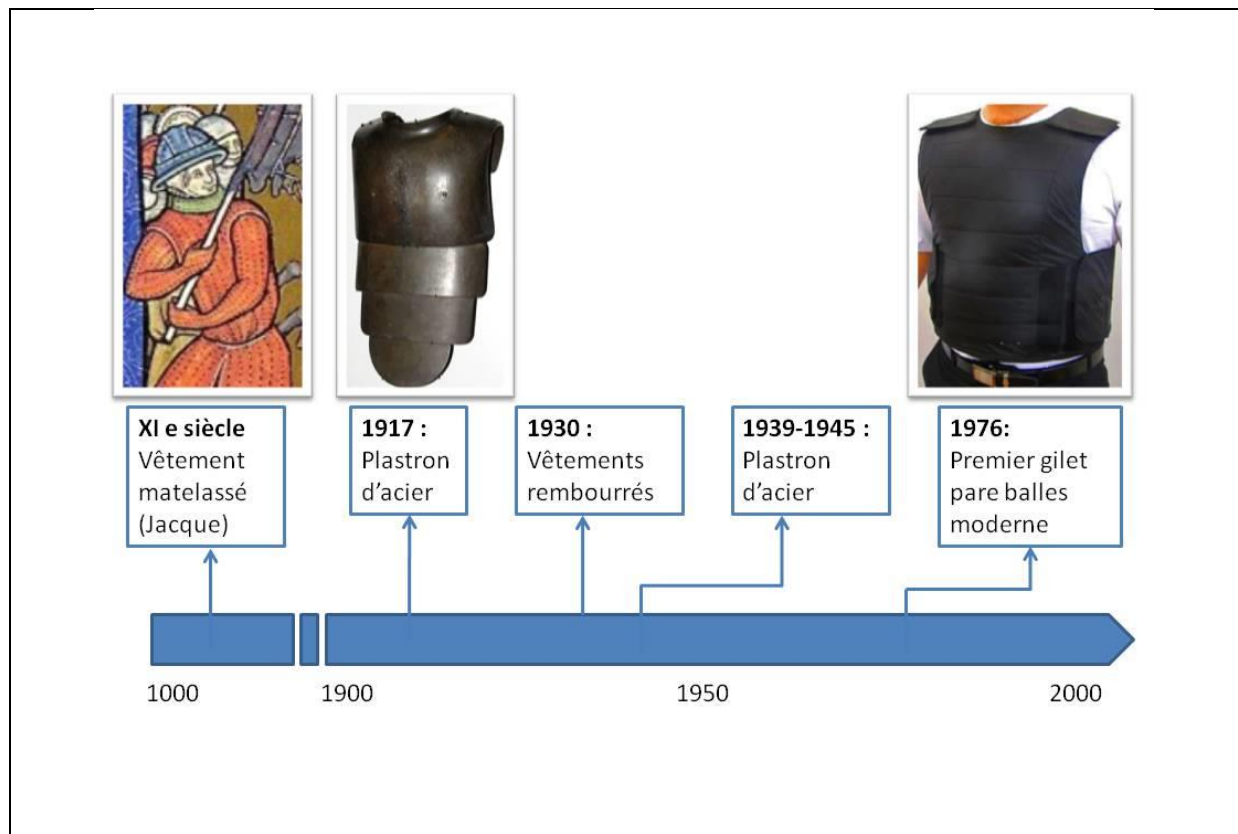
Le gilet pare-balles et le casque de moto

Au cours de ce TP, vous allez être amené à mettre en application la démarche de choix des matériaux basée sur les indices de performances et les cartes de sélection pour déterminer le meilleur matériau pour concevoir un gilet pare-balles, et un casque de moto.

Le gilet pare-balles sera présenté comme un exemple détaillé de mise en application de la démarche de choix de matériaux. L'exemple du casque de moto sera un exercice d'application du choix de matériaux pour la protection des personnes.

Historique : depuis l'antiquité, l'Homme a toujours cherché à se protéger des projectiles ennemis. Cependant les premiers vêtements de protection ne sont apparus que tard dans l'Histoire, et ont peu évolués jusqu'au début du XX^{ème} siècle.

- Au Moyen-Age : Au XI^{ème} siècle est apparu le premier vêtement développé dans le but de protéger le porteur des projectiles ennemis : la Jacque. Ce vêtement consistait en un empilement de couches de tissu qui empêchaient les flèches d'atteindre le corps du porteur.
- En 1917 : lors de leur entrée en guerre, les soldats américains ont emporté avec eux le premier gilet pare-balles de l'histoire. Ce gilet était en réalité un plastron d'acier au nickel-chrome. Ce système a cependant été rapidement abandonné par l'armée américaine en raison de son poids de 18kg...
- Dans les années 30, dans le cadre du développement de la grande criminalité américaine liée à l'avènement de la mafia, le grand banditisme cherche à se protéger des règlements de comptes qui étaient monnaie courante. Les hommes de mains de la mafia portent donc des vestes rembourrées de coton. L'efficacité de ces vestes reste très limitée. En effet, seules quelques balles d'armes de poing tirées à longue distance étaient arrêtées.
- Au cours de la Seconde guerre mondiale, l'armée rouge développe à son tour un plastron d'acier pour protéger ses soldats lors des combats. Ce système est en fait une évolution de celui de 1917 : un plastron d'acier au nickel formé de deux plaques pressées. Ces plastrons permettent de se protéger des balles allemandes au-delà de 100m mais restent lourds et pénalisent la mobilité des soldats. Ces plastrons ont néanmoins été largement utilisés lors des combats urbains comme Stalingrad où il fallait défendre sa position et non prendre des territoires.
- Il faut attendre 1976 pour voir naissance du gilet pare-balles moderne. Son avènement est lié à l'apparition dans les années 70 d'un nouveau matériau : le Kevlar (ou fibre d'aramide). Ses excellentes propriétés mécaniques sont d'abord mises en œuvre par l'industrie des pneumatiques, mais intéresse également fortement le National Institute of Justice américain. Le Kevlar est soumis à une batterie de test drastique afin de déterminer s'il est capable d'arrêter une balle. Les résultats sont excellents et le premier gilet pare-balles à fibre de Kevlar est mis au point par Richard Davis en 1976.

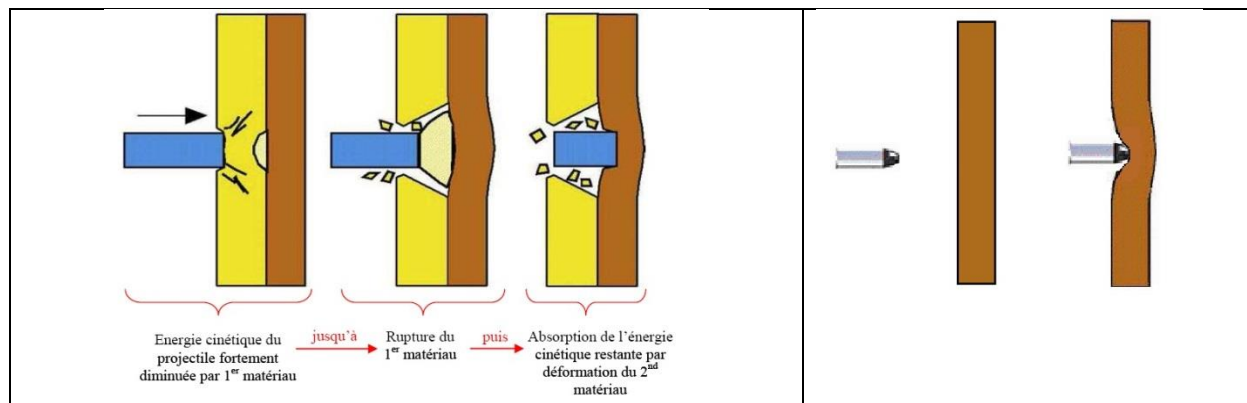


Notions de mécanique : la dynamique rapide

La dynamique rapide est la science qui étudie et analyse les mouvements d'un solide lancé à grande vitesse. Cette science est utilisée notamment pour l'étude des collisions et des crashes. C'est ce domaine de la mécanique qui nous permettra de décrypter le fonctionnement du gilet pare-balles notamment grâce au théorème de l'énergie cinétique. Ce théorème nous dit que la variation d'énergie cinétique entre deux instants est égale aux travaux des efforts extérieurs appliqués au solide. Le gilet pare-balles est conçu dans le but d'absorber l'énergie cinétique de la balle de deux façons différentes, afin de protéger le porteur : en transformant l'énergie cinétique de la balle en énergie de déformation (élastique et plastique), et en absorbant l'énergie cinétique de la balle grâce à la forte énergie de cohésion du matériau utilisé.

Cas du verre blindé : le verre possède une excellente limite d'élasticité et un très bon module d'Young, mais reste fragile (pas de déformation plastique possible). Le verre blindé comble la fragilité du verre par l'insertion, entre les couches de verre, de couches de polymère, qui sont des matériaux d'une excellente ductilité. Ils sont ainsi capables de se déformer plastiquement de façon importante, et donc d'absorber l'énergie cinétique restante.

1. Cas du gilet pare-balles : le cas du gilet pare-balles est quelque peu différent. En effet, ce système doit avoir une masse et un volume minimum, afin de ne pas pénaliser les mouvements de son porteur. L'absorption d'énergie cinétique est donc réalisée par un seul matériau, qui doit être à la fois résistant (bon module d'Young et bonne limite d'élasticité) et ductile, afin de dissiper beaucoup d'énergie. En effet, l'énergie dissipée pour déformer plastiquement un matériau est très supérieure à l'énergie de déformation élastique.

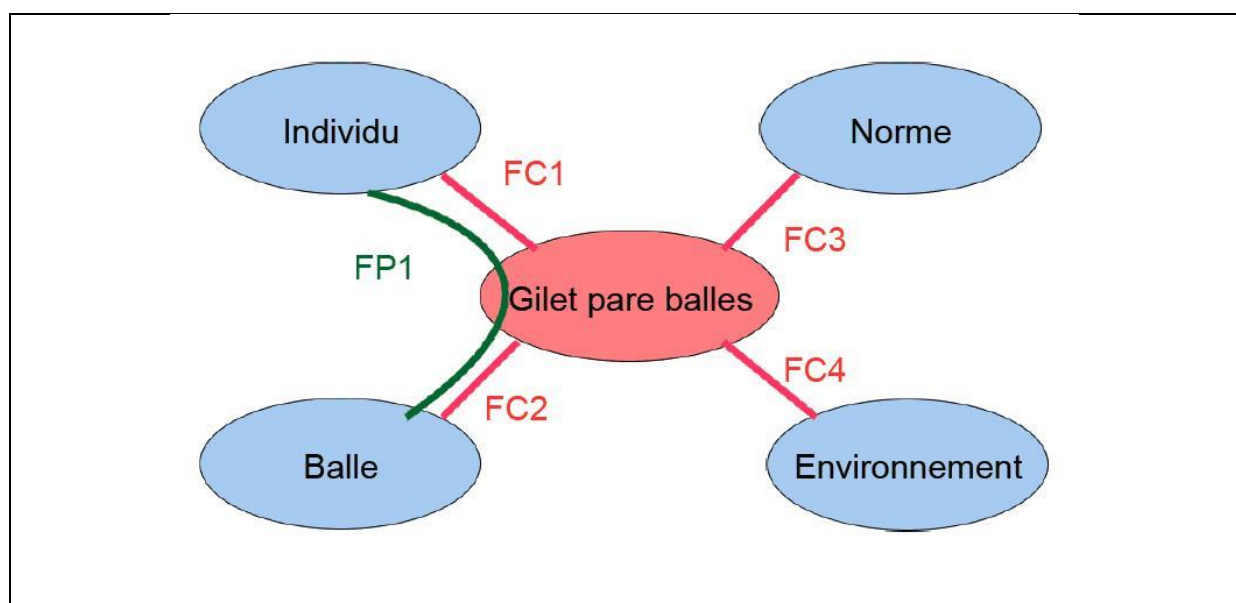


Cahier des charges – analyse fonctionnelle du gilet pare-balles : on se propose d'utiliser une représentation sous forme d'un diagramme type pieuvre (aussi appelé diagramme des interactions), qui permet de déterminer les fonctions à réaliser par le système (ou fonctions principales) et les contraintes qui lui sont imposées lors de son fonctionnement (ou fonctions contraintes).

La mise en place du diagramme pieuvre nécessite donc avant tout de lister les milieux extérieurs au système. Il y a bien sûr ici la balle et l'utilisateur, qui sont liés ensemble par la fonction principale. Le gilet devra aussi faire face à l'environnement extérieur (pluie, poussière, rayonnement UV...). De plus, la législation impose qu'un gilet soit certifié pour résister à certains types de projectiles. Nous nous concentrerons sur les projectiles dits "type II" qui sont les armes de poing les plus communes.

Fonctions associées au diagramme pieuvre (représentation simplifiée) :

- FP1 : Protéger l'individu des balles
- FC1 : Être adapté à l'individu (poids, volume...)
- FC2 : Absorber l'énergie cinétique de la balle
- FC3 : Être agréé Type II
- FC4 : Résister à l'environnement.



Les fonctions que nous avons explicitées grâce au diagramme pieuvre peuvent encore être détaillées. Ce détail permet d'aller plus loin dans la réflexion et de prendre en compte la totalité des paramètres influant sur le matériau.

- FP1 : Protéger l'individu des balles : le matériau doit être capable d'encaisser la totalité de l'énergie cinétique de la balle afin que la balle n'atteigne pas le corps du porteur.
- FC1 : Être adapté à l'individu : la masse du gilet ne doit pas dépasser 10% de la masse du porteur ou ses mouvements seront pénalisés. Egalement, le gilet doit avoir une forme qui corresponde au mieux à la forme du buste du porteur.
- FC2 : Absorber l'énergie cinétique de la balle : ici encore, le matériau doit être capable d'encaisser la totalité de l'énergie cinétique de la balle afin que la balle n'atteigne pas le corps du porteur.
- FC3 : Être agréé Type II : un gilet pare-balles n'est pas utilisable pour tout type de projectile. Dans notre cas des projectiles classés type II (voir tableau).
- FC4 : Résister à l'environnement (ou milieu ambiant) : le gilet ne doit pas être détérioré lors d'un usage normal (mouvements du porteur, contact avec des objets courants...), mais également le gilet doit être utilisable dans des plages de température allant de -20 à +50°C, et enfin le gilet ne doit pas être altéré par la pluie, la transpiration (~eau salée) ou les UV.

Niveau	Représentation	Calibre	Vélocité	Energie Cinétique
Type I		• 0.22 LRHV (2.6g) • 0.38 Caliber (10.2 g)	320 – 335 m/s 260 – 275 m/s	133 – 146 J 346 – 386 J
Type IIA		• 0.357 Magnum (10.2g) • 9 mm (8.03g)	380 – 400 m/s 330 – 350 m/s	736 – 816 J 437 – 492 J
Type II		• 0.357 Magnum (10.2g) • 9 mm (8.03g)	425 – 440 m/s 360 – 375 m/s	736 – 816 J 437 – 492 J
Type IIIA		• 0.44 Magnum (15.5g) • 9 mm (8.03g)	425 – 440 m/s 425 – 440 m/s	1400 – 1500 J 725 – 777 J
Type III		• 7.62 mm (9.72g)	840 – 855 m/s	3430 – 3553 J
Type IV		• 0.30 Caliber (10.7g)	865 – 880 m/s	4003 – 4143 J

Indices de performances :

Nous allons maintenant essayer de déterminer les équations qui régissent le choc de la balle sur le gilet afin d'en extraire des indices de performance du matériau. Pour rappel, un indice de performance est une expression qui lie un ou plusieurs paramètres matériau (limite d'élasticité σ_e , module d'Young E ...). Et donc pour exprimer un indice de performance, les paramètres dépendants des sollicitations ou de la géométrie (comme le volume) sont éliminés, afin de ne conserver que les grandeurs caractéristiques du matériau.

Théorème de l'énergie cinétique : la principale équation qui régit le comportement du gilet pare-balles est le théorème de l'énergie cinétique. Le théorème de l'énergie cinétique dit que "la variation d'énergie cinétique entre un état initial et un état final est égale à la somme des travaux des forces extérieures."

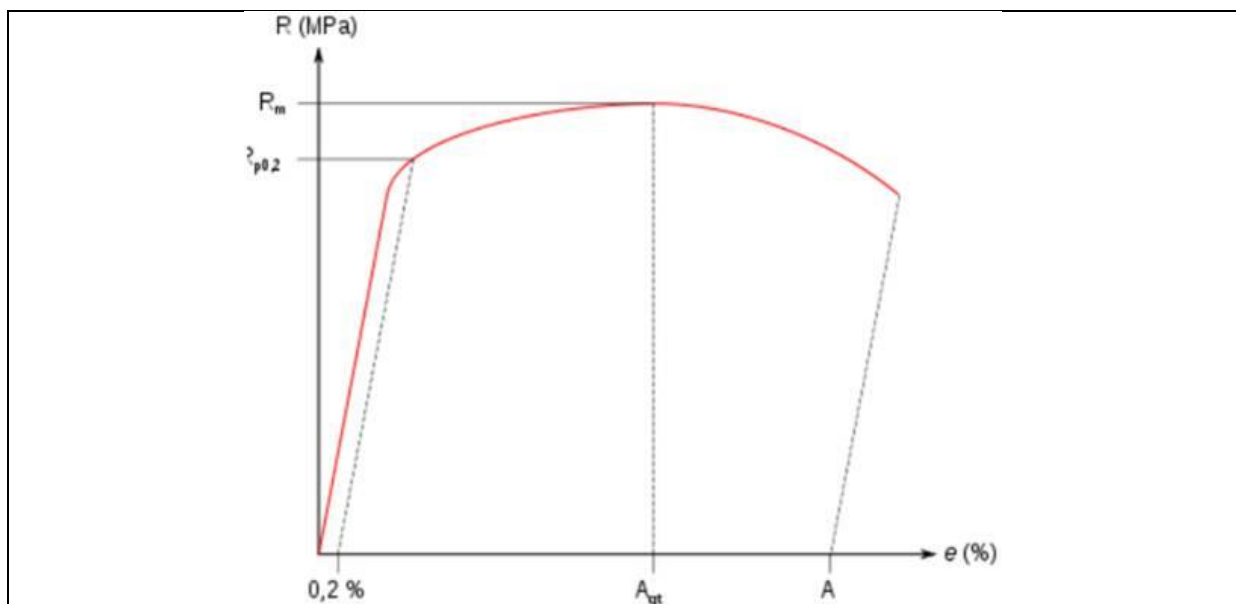
Dans notre cas, la balle est stoppée grâce à la déformation du matériau.

- A l'état initial, la balle est projetée à une vitesse v_0 et possède une énergie cinétique E_{c0} . Le gilet est intact.
- A l'état final, la balle est stoppée (énergie cinétique nulle) grâce à la déformation du gilet. C'est donc grâce à l'énergie de déformation du milieu que l'on annule l'énergie cinétique de la balle.

Energie de déformation élastique : l'énergie nécessaire à la déformation d'un matériau est obtenue à partir de l'aire sous la courbe contrainte/déformation du matériau. Cette aire peut être partagée en deux domaines distincts :

- déformation élastique
- déformation plastique

Nous allons commencer par le domaine élastique. La quantité d'énergie absorbée par un matériau sous forme de déformation élastique est exprimée par l'aire sous la partie élastique de la courbe de contrainte en fonction de la déformation. L'énergie de déformation élastique s'exprime alors en fonction de la limite d'élasticité, de la déformation élastique et du volume.



L'aire sous le triangle vaut : $A = \frac{1}{2} \cdot \sigma_e \cdot \epsilon_e$

Pour calculer l'énergie de déformation, il faut multiplier l'expression précédente par le volume afin de revenir à des joules : $W = \frac{1}{2} \cdot \sigma_e \cdot \epsilon_e \cdot V$. On obtient ainsi l'énergie volumique absorbée dans le domaine élastique.

Remplaçons la déformation à l'aide de la loi de Hooke : $\sigma = E \epsilon$, soit $\epsilon = \sigma / E$ et donc $\epsilon_e = \sigma_e / E$. On obtient : $W = \sigma_e^2 \cdot V / 2 \cdot E$

On peut donc définir l'indice de performance I_1 , en considérant le volume comme une constante géométrique, et donc on peut le supprimer de l'expression, tout comme la constante 2. On obtient l'indice $I_1 = \sigma_e^2 / E$.

Cet indice représente la maximisation de l'énergie absorbée dans le domaine élastique du matériau par unité de volume. La masse du gilet est déterminante. On s'intéressera donc aussi à la maximisation de l'énergie absorbée par 1 kg de matière via l'indice $I_{1bis} = \sigma_e^2 / E \rho$.

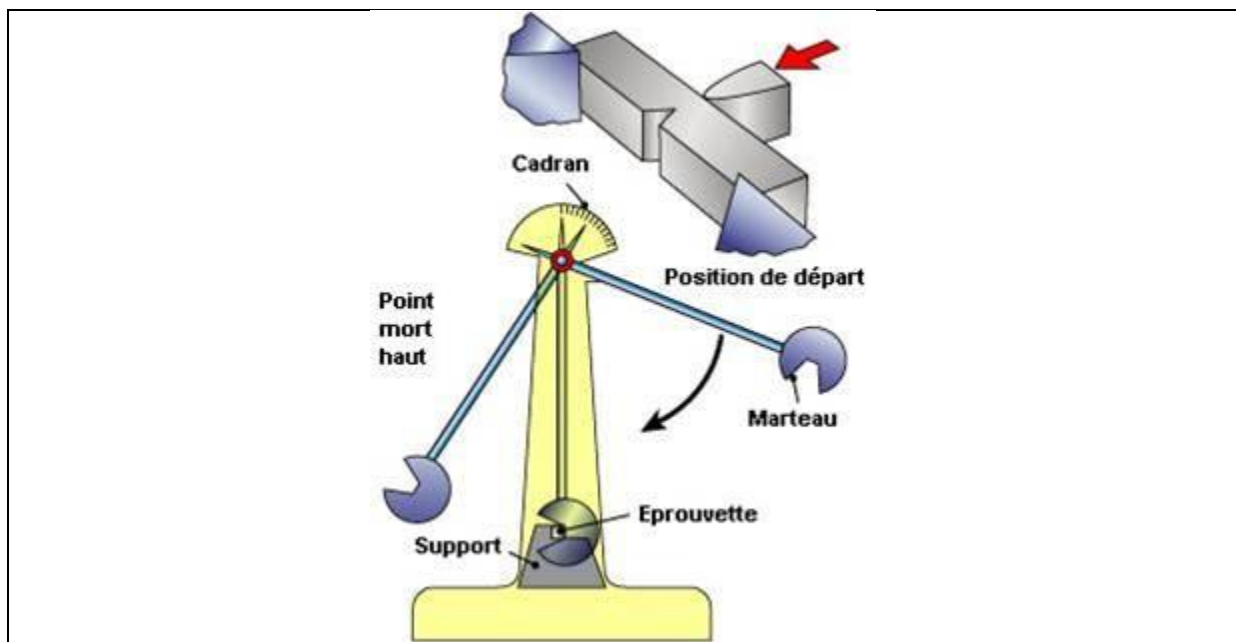
Energie de déformation plastique : le cas de la déformation plastique est beaucoup plus délicat. En effet, il n'est pas possible d'obtenir une approximation de l'aire sous la courbe par un élément géométrique simple puisque la relation contrainte/déformation est difficile à mettre en œuvre dans le domaine plastique. Nous n'allons donc pas calculer cette énergie mais l'estimer grâce à un essai en laboratoire : l'essai de Charpy ou essai de résilience.

Cet essai permet d'obtenir l'énergie nécessaire à la rupture d'un matériau et de caractériser sa résistance aux chocs. Pour ce faire, on utilise une éprouvette parallélépipédique munie d'une entaille en U ou en V. On donne une certaine position de départ au marteau qui accumule alors de l'énergie potentielle de pesanteur. On lâche le marteau qui vient briser l'éprouvette et arrive à son point mort haut.

Il suffit de lire la position du marteau après le choc pour connaître son énergie cinétique après rupture de l'éprouvette. La différence de ces deux énergies (initiale et finale) donne directement l'énergie nécessaire à la rupture de l'éprouvette W_r .

L'énergie de rupture n'est cependant pas directement un paramètre matériau. On peut cependant rapprocher l'énergie de rupture mesurée par l'essai de Charpy à la ténacité K_{Ic} , la ténacité étant le facteur d'intensité de contrainte qui définit la contrainte ou la taille critique d'une fissure qui mène à la rupture brutale du matériau. La ténacité est, elle, un paramètre caractéristique de chaque matériau.

De nombreuses formules empiriques reliant W_r à K_{Ic} existent mais on peut les définir généralement de la façon suivante : $K_{Ic} = \alpha \cdot W_r^{1/2}$



Indice de performance I_2 : si nous ré-écrivons le théorème de l'énergie cinétique afin de calculer l'indice de performance : $E_{c(\text{initiale})} - E_{c(\text{finale})} = E_{\text{déformation}}$

On a $E_{c(\text{initiale})} = \frac{1}{2} mv^2 = W_r = K_{Ic}^2 / \alpha^2$

Le seul paramètre matériau de cette expression est la ténacité K_{Ic} (α est une constante). L'indice de performance associé est donc : $I_2 = K_{Ic}$.

Choix du matériau :

On vient de déterminer 4 indices de performance, mis en place pour choisir le meilleur matériau pour la réalisation d'un gilet pare-balles. Nous allons maintenant réaliser les cartes CES Selector utilisées afin de choisir le meilleur candidat.

On vous demande de tracer ici les cartes suivantes :

- Limite d'élasticité en fonction du module d'Young (indice I_1)
- Limite d'élasticité spécifique en fonction du module spécifique (indice I_{1bis})
- Ténacité en fonction de la masse volumique (indice I_2)

Voici les matériaux retenus après application de tous les indices de performance :

- Nous retrouvons tout d'abord certains aciers et plus particulièrement les aciers à outils. Ces aciers présentent d'excellentes caractéristiques mécaniques et sont ductiles. Seul problème : leur masse volumique très élevée.
- Nous retrouvons aussi des élastomères comme la gomme. Rien de très surprenant puisque les élastomères possèdent cette faculté à emmagasiner de l'énergie comme dans les élastiques. Cependant ils ne sont pas assez rigides pour l'application visée.
- On remarque également sur les cartes que les céramiques possèdent une très bonne aptitude à emmagasiner de l'énergie sous forme de déformation élastique grâce à leurs très hauts modules d'Young et limite d'élasticité. Ils possèdent également une très bonne résistance à la pression de Hertz. Cependant ce sont des matériaux trop fragiles pour un gilet pare-balles.
- Ce sont au final les composites qui se présentent comme étant les plus performants et notamment les KFRP (Kevlar Reinforced Polymers) et les CFRP (Carbon Reinforced Polymers). Dans la réalité, les gilets pare-balles sont réalisés en fibre de Kevlar tissées (pas de matrice polymère). Ceci rend le gilet léger et très résistant aux chocs.

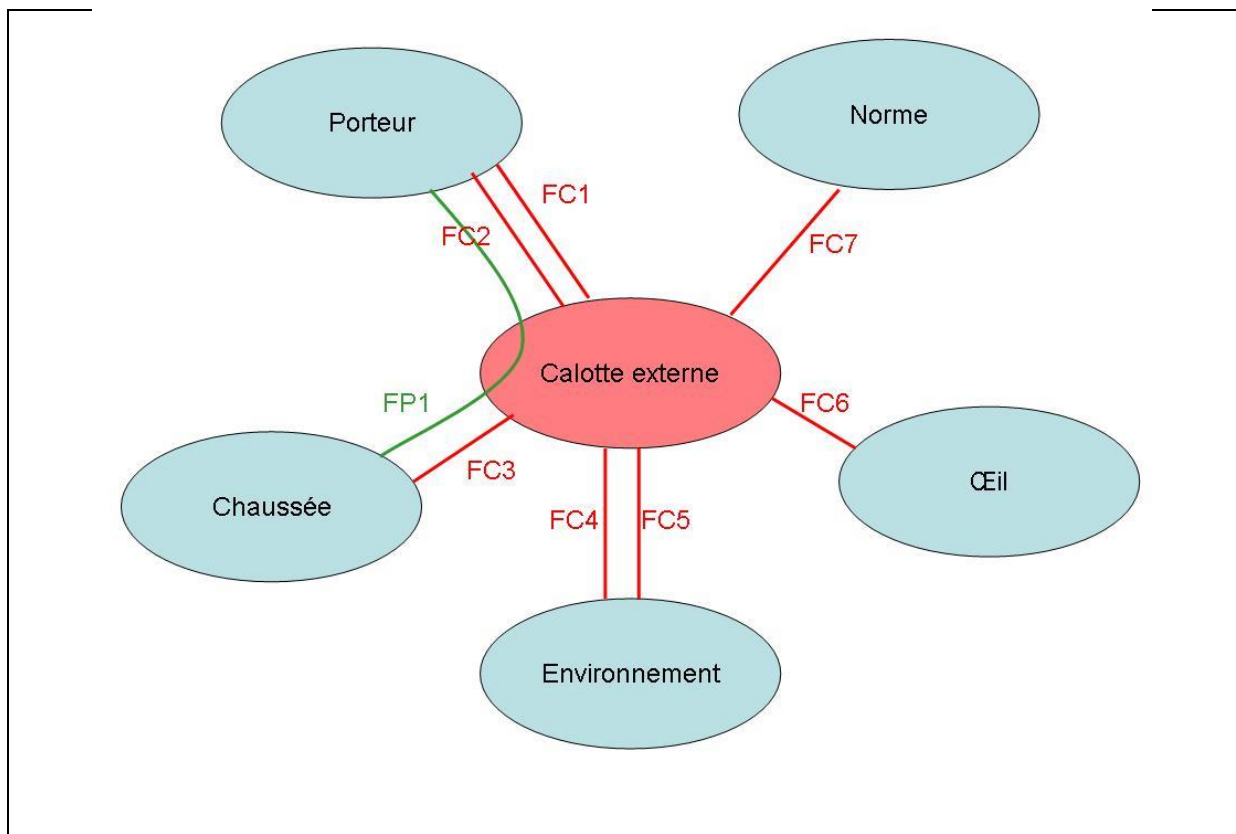
Matériau	I1	I1bis X e-03	I2	I3	Total
Acier à outils	19	2,4	18,3 – 21,5	0,18	0,15 – 0,18
CFRP	17,8	17,8	10,8 – 82,6	0,4	2,2 – 16,8
GFRP	2,25 – 30,25	1,3 – 1,8	5 – 20	0,02 – 0,8	$2 \cdot 10^{-4}$ – 0,9
KFRP	20,6	14,7	6,8 – 43,8	0,35	0,7 – 4,6

2. **Le casque de moto** : afin de mettre en application vos connaissances récemment acquises sur la protection des personnes, on vous propose de déterminer les meilleurs matériaux à utiliser afin de réaliser un casque de moto.

L'étude sera découpée en trois grandes parties qui correspondent aux trois parties principales du casque présentées sur l'image ci-dessous, c'est-à-dire la calotte externe, la calotte interne et la visière. Chaque élément sera traité entièrement, du cahier des charges au choix final de matériau en une seule traite.

a. **La calotte externe** : c'est la partie visible du casque. C'est cette partie qui empêche la pénétration d'objets pointus et qui protège la tête du porteur en cas de glissade après une chute sur la chaussée.

- **Cahier des charges spécifique** : comme dans le cas du gilet pare-balles, on va commencer par déterminer les fonctions à réaliser par l'objet, et les résumer sous forme d'un diagramme pieuvre (ou diagramme des interactions). Puis on déterminera les fonctions associées en fonction du milieu extérieur.



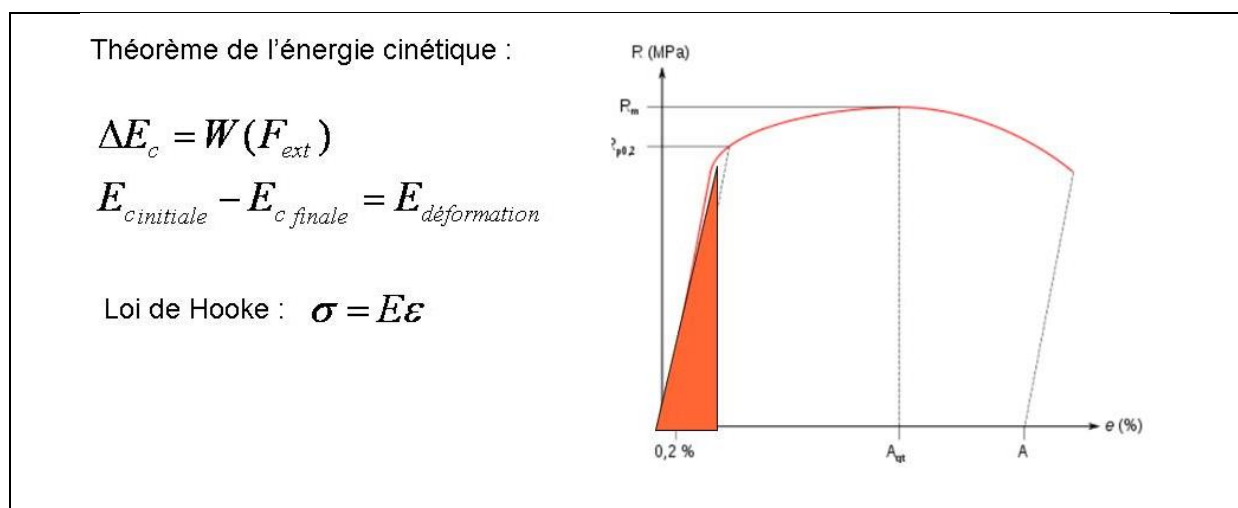
- FP1 : Protéger le porteur des chocs avec la chaussée ou autres obstacles.
- FC1 : Doit être adaptée à la morphologie de l'utilisateur.
- FC2 : Doit être ergonomique (masse minimale).
- FC3 : Doit résister aux chocs et aux glissades sur la chaussée.
- FC4 : Doit résister au milieu ambiant (température, pluie, ultraviolets...).
- FC5 : Doit être recyclable.
- FC6 : Doit être esthétique (possibilité de coloration, mise en place d'autocollants...).
- FC7 : Doit répondre aux normes de sécurité en vigueur.

- Indices de performances : pour déterminer des indices de performance, nous allons commencer par lister les phénomènes physiques impliqués dans le fonctionnement de la calotte externe.

1) Energie cinétique : comme lors de l'étude du gilet pare-balles, nous retrouvons le phénomène d'absorption d'énergie cinétique. En effet, lorsque le porteur subit un choc ou une chute, le casque doit absorber l'énergie cinétique de sa tête afin de le protéger d'éventuelles lésions.

On reprend donc le théorème de l'énergie cinétique qui nous dit que la variation d'énergie cinétique est égale à la somme des travaux des efforts extérieurs appliqués au système.

1. Déterminez l'aire sous la partie élastique de la courbe de la contrainte en fonction de la déformation en fonction de la limite d'élasticité et de la déformation élastique.
2. En déduire l'énergie de déformation élastique.
3. Remplacez la déformation élastique par la contrainte à l'aide de la loi de Hooke.
4. Exprimez l'indice de performance qui donne la capacité d'absorption d'énergie cinétique sous forme d'énergie élastique par unité de volume.
5. Exprimez l'indice de performance qui donne la capacité d'absorption d'énergie cinétique sous forme d'énergie élastique par unité de masse en faisant intervenir la masse volumique.



1. L'aire sous la courbe dans le domaine élastique est égale à l'aire du triangle orange :

$$A = \frac{1}{2} \cdot \sigma_e \cdot \varepsilon_e$$
2. L'énergie de déformation est obtenue en multipliant par le volume. D'où $W = \frac{1}{2} \cdot \sigma_e \cdot \varepsilon_e \cdot V$
3. En remplaçant la déformation par la contrainte à l'aide de la loi de Hooke, on obtient :

$$W = \sigma_e^2 \cdot V / 2 \cdot E$$
4. En supprimant les paramètres qui sont les constantes géométriques ou les sollicitations, on obtient l'indice de performance suivant : $I_I = \sigma_e^2 / E$
5. En faisant intervenir la masse volumique, on obtient l'indice de performance suivant pour définir la capacité d'absorption d'énergie du matériau sous forme de déformation élastique par unité de masse : $I_{Ibis} = \sigma_e^2 / E \cdot \rho$

Passons maintenant au domaine plastique. Comme nous l'avons vu dans le cas du gilet pare-balles, il est difficile de déterminer l'énergie emmagasinée dans le domaine plastique par le

calcul. La solution la plus simple est d'utiliser l'énergie nécessaire à la rupture de l'éprouvette obtenue lors de l'essai de résilience.

1. Ré-écrivez le théorème de l'énergie cinétique en faisant apparaître l'énergie de rupture W_r .
2. Exprimer l'énergie absorbée en fonction de la ténacité et déterminez l'indice de performance I_2 associé.

1. L'énergie cinétique est égale à l'énergie totale de déformation. Donc $E_c = W_r$
2. L'énergie de déformation à rupture est proportionnelle à la racine carrée de la ténacité. Donc :

$$E_c = K_{Ic}/\alpha^2$$

Seule la ténacité est ici une grandeur qui n'est pas une constante et qui ne dépend ni de la géométrie ni des sollicitations. Donc : $I_2 = K_{Ic}$

Nous avons vu, lors de la réalisation du cahier des charges, que la calotte externe servait également à protéger le porteur de la pénétration d'objets. Pour tenir compte de ce phénomène, nous pouvons considérer deux cas :

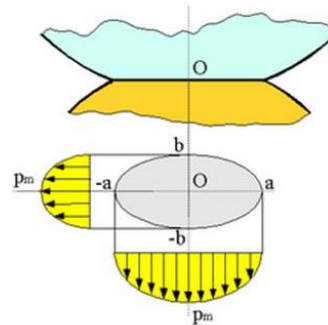
- Le matériau doit présenter une bonne dureté pour résister à la pénétration.
- Le matériau doit être capable de résister à une certaine pression au moment du choc.

Nous allons nous intéresser à la résistance à la rayure et à la pénétration dans la partie suivante.

Comme dans le cas du gilet pare-balles, le contact avec la chaussée provoque un phénomène de contacts ponctuels avec les gravillons ou les cailloux au moment du choc. Un contact ponctuel est impossible en réalité. Les surfaces se déforment et un phénomène de concentration de contraintes au niveau du contact apparaît. Pour tenir compte de ces contraintes de contact, nous allons utiliser le critère de la pression de Hertz. Ce critère nous dit que pour conserver son intégrité, la pression appliquée au système doit être inférieure à une valeur limite donnée par la formule :

Pression de Hertz :

$$p_0 = \sqrt[3]{\frac{6P.E^2}{\pi.R^2}} < R_e$$



A l'aide de la formule de la pression de Hertz, exprimez l'indice de performance I_3 associé à la résistance du matériau à une contrainte de contact.

La contrainte de contact prend la valeur suivante : $p_0 = (6.P.E^2/\pi.R^2)^{1/3}$

Cette pression critique doit être inférieure à la limite élastique pour ne pas dégrader la forme du casque.

Exprimons l'indice de performance associé :

$$\sigma_e > (6.P.E^2/\pi.R^2)^{1/3}$$

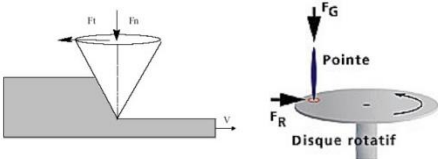
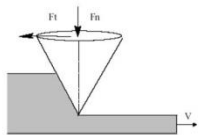
$$\sigma_e^3 > 6.P.E^2/\pi.R^2$$

$$\sigma_e^3 / E^2 > 6.P / \pi.R^2$$

En éliminant les grandeurs dépendantes des sollicitations, de la géométrie du problème et les constantes, on obtient : $I_3 = \sigma_e^3 / E^2$

La calotte extérieure doit enfin résister à une glissade sur la chaussée. Nous accepterons bien sûr que la calotte externe soit rayée après une glissade mais il ne faut pas que le casque soit détruit pour autant. Pour prendre en compte l'apparition de ce phénomène, nous devons caractériser la résistance à la rayure (ou résistance à l'abrasion) du matériau. On caractérise la résistance à la rayure d'un matériau via un essai que l'on pourrait nommer essai de dureté dynamique.

L'éprouvette, constituée du matériau dont on souhaite tester la résistance à la rayure, a une forme de disque. On vient imposer un effort sur l'éprouvette via un indenteur en matière très dure comme du diamant. On fait tourner l'ensemble et on mesure la quantité de matière perdue lors de l'essai en mesurant la variation de masse.

Résistance à la rayure	
	Loi d'Archard : $V = K_a \frac{F}{P} L$ Relations utiles : $P < R_e$ $R_e = \alpha.H$ Légende : -V : volume de matière enlevée -K_a : coefficient d'usure -F : effort normal appliqué sur la surface -P : pression admissible par le matériau -H : Dureté -α : coefficient de proportionnalité 

La résistance à la rayure est donnée par la relation suivante : $W = V/L$

Avec : V le volume de matière enlevée,

L la distance de glissement,

W le volume d'usure par unité de longueur.

L'abrasion est donnée par la loi dite loi d'Archard, qui donne la relation entre le volume de matière enlevé, l'effort normal appliqué sur la surface, la pression admissible et la distance de contact : $V = K_a F.L/P$.

Nous allons utiliser cette loi pour déterminer l'indice de performance I_4 qui définira la résistance du matériau à l'usure par abrasion.

- Introduisez W, le volume d'usure par unité de longueur, dans la loi d'Archard.
- Introduisez la limite d'élasticité, puis la dureté dans l'expression de la loi d'Archard.
- Exprimez l'indice de performance associé.

1) Loi d'Archard : $V = K_a.F.L/P$

Or : $W = V/L$

D'où : $W = K_a.F/P$

2) Introduction de grandeurs matériaux : limite d'élasticité, dureté

$$P = \sigma_e \text{ (condition de résistance)}$$

$$\text{Or } \sigma_e = \alpha.H$$

$$\text{Donc } W = K_a.F/(\alpha.H)$$

3) Expression de l'indice de performance : on souhaite minimiser le volume perdu pour résister au mieux à l'abrasion. Il faut donc minimiser W .

L'indice de performance à minimiser, après élimination des paramètres dépendant des sollicitations, est le suivant : $I_4 = K_a/H$.

Nous allons maintenant tracer toutes les cartes CES correspondantes et nous terminerons par le choix d'un ou plusieurs matériaux.

Compte tenu des indices de performance précédemment déterminés, on se propose de tracer les cartes suivantes :

- Limite d'élasticité en fonction du module d'Young (indices I_1 et I_3)
- Limite d'élasticité spécifique en fonction du module spécifique (indice I_{1bis})
- Ténacité en fonction de la masse volumique (indice I_2)
- Constante d'usure en fonction de la dureté (indice I_4)

Les matériaux intéressants sont plus ou moins identiques à l'étude du gilet pare-balles :

- On obtient une nouvelle fois les aciers à outils. Ces aciers sont tenaces et emmagasinent une énergie volumique importante mais l'indice I_{1bis} qui nous donne leur absorption d'énergie massique est beaucoup moins intéressant. Ces aciers sont de plus très difficiles à mettre en forme du fait de leurs hauts modules d'Young et limite d'élasticité. Leur résistance à l'usure est honorable mais est en dessous de celle de composites et des polymères.
- Les composites sont là encore les matériaux les plus performants, notamment concernant les CFRP et KFRP et leur très grande capacité à emmagasiner de l'énergie par rapport à leur faible masse.
- On remarque que les polymères et notamment le polycarbonate réalisent le tour de force d'égaliser la capacité d'absorption d'énergie massique des aciers à outils en présentant une très bonne résistance à l'usure (100 fois supérieure à celle des aciers).

Si nous allons plus loin dans le raisonnement, les aciers sont écartés pour d'autres raisons : leur mauvaise résistance à la corrosion. Or le casque sera soumis à de la pluie, et ceci est plutôt gênant. Il nous reste donc deux choix possibles :

- Les CFRP, KFRP, GFRP.
- Le polycarbonate.

Le choix de matériau se fait donc en fonction du type de casque réalisé et de son prix :

- Si le casque à réaliser est un casque hautes performances pour des secteurs comme le sport mécanique ou pour du très haut de gamme, on choisira les composites car dans ces secteurs le prix importe peu (CFRP : 100 Euros/kg - KFRP : 60 Euros/kg - GFRP : 20 Euros/kg). Leurs excellentes performances en font des matériaux idéaux pour la protection des personnes.
- Si le casque à réaliser est un casque accessible au grand public donc de prix faible, on préférera le polycarbonate (3 Euros/kg). Ce polymère présente des performances tout à fait convenables puisqu'il tient la dragée haute aux aciers. C'est un thermoplastique, qui est donc parfaitement adapté pour réaliser de la grande série par moulage par exemple. Le polycarbonate présente également la particularité d'être transparent et est très facilement coloré en lui ajoutant des colorants. Il est donc parfaitement adapté à la réalisation de pièces

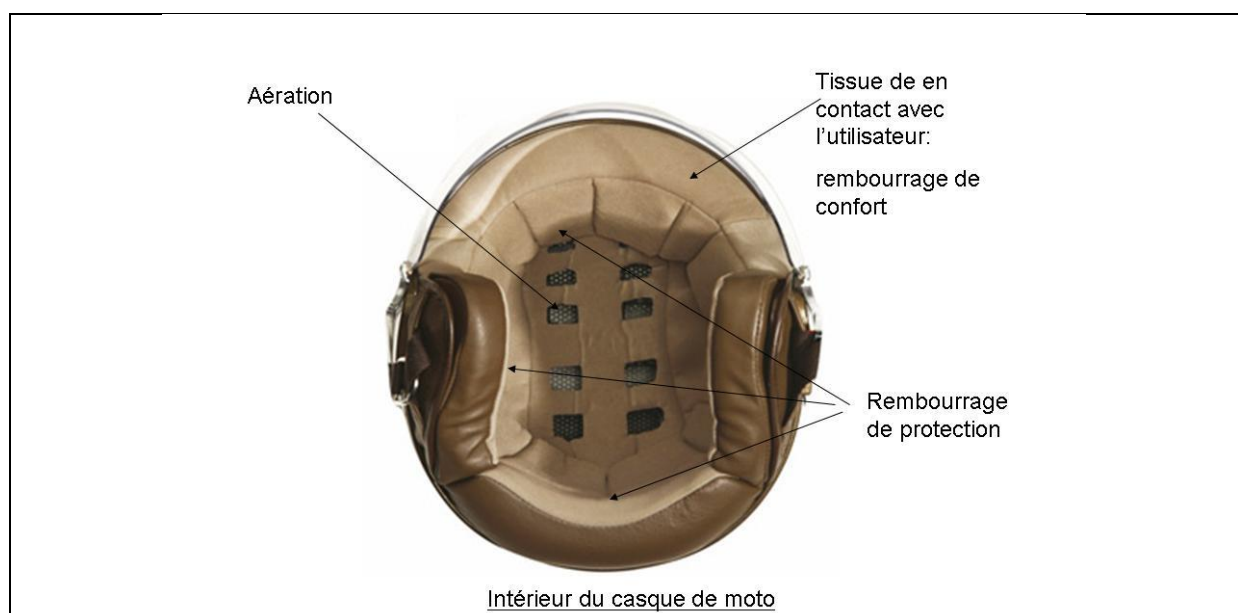
d'aspect, une fois coloré et verni, et fonctionnera très bien dans l'échelle de température définie dans le cahier des charges (entre -20 et +50°C).

Matériau	I1	I1bis X e-03	I2	I3	I4
Acier à outils	19	2,4	18,3 – 21,5	0,18	e-18
CFRP	17,8	17,8	10,8 – 82,6	0,4	e-18
GFRP	2,25 – 30,25	1,3 – 1,8	5 – 20	0,02 – 0,8	e-17
KFRP	20,6	14,7	6,8 – 43,8	0,35	e-17
PC	2,62	2,3	3,8 – 4,6	0,08	e-16

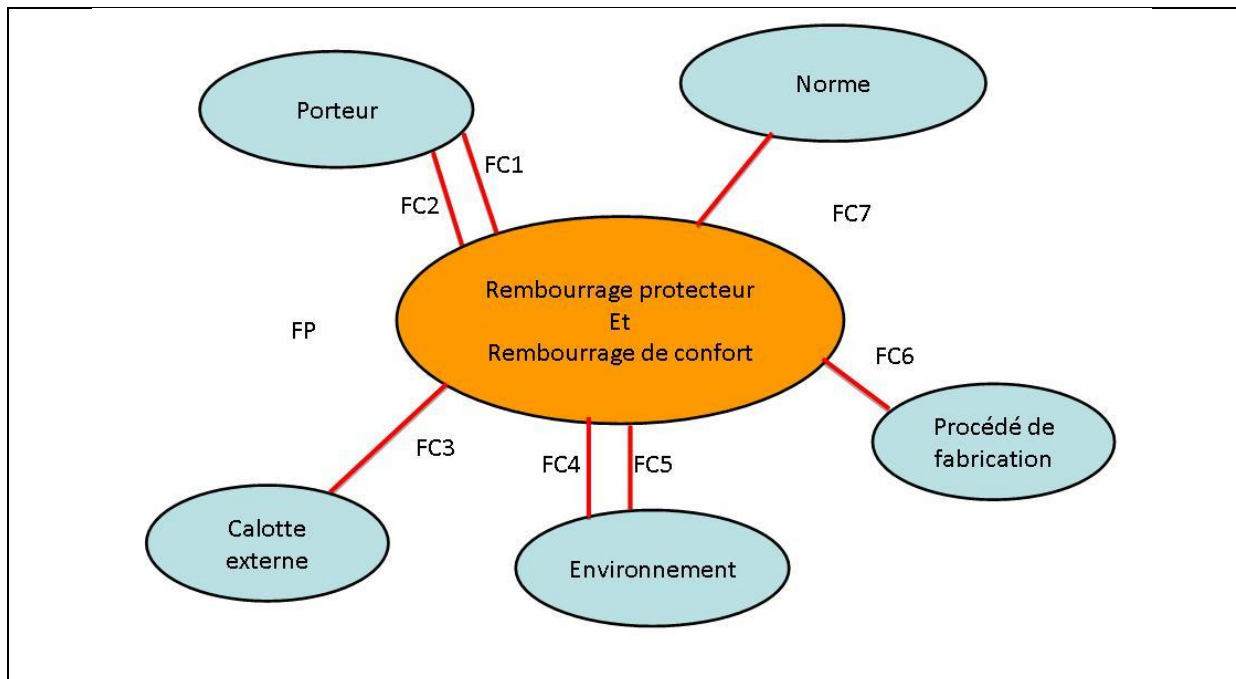
b. La partie intérieure : L'intérieur du casque est composé de deux parties :

- Le rembourrage protecteur qui a un rôle majeur dans la protection de l'individu car c'est lui qui absorbe l'énergie d'impact lors d'un choc. La calotte qui est l'extérieur du casque elle a pour but de se déformer et ainsi de répartir les forces dues aux chocs.
- Le rembourrage de confort c'est la couche interne du casque assurant le confort de l'utilisateur. Il est généralement, pour les casques de bas de gamme, composé d'un simple tissu qui emballe les matériaux de rembourrage de protection. En revanche pour les casques de gamme supérieure ce tissu est plus complexe et possède des fonctions telles que la régulation active de la température, ou antibactériennes.

Dans la suite nous allons principalement nous intéresser au rembourrage de protection car c'est sur lui que repose la protection de l'individu.



- Cahier des charges spécifique : ici encore, on va déterminer les fonctions à réaliser par l'objet, et les résumer sous forme d'un diagramme pieuvre. Puis on déterminera les fonctions associées en fonction du milieu extérieur.



- FP1 : Absorber les chocs
- FC1 : Doit être adapté à la morphologie de l'utilisateur
- FC2 : Doit être ergonomique (confortable et masse minimale)
- FC3 : Doit absorber les chocs issus de la calotte
- FC4 : Doit éviter l'accumulation de chaleur dans le casque
- FC5 : Doit permettre une bonne écoute de l'utilisateur
- FC6 : Doit être moulée (compte tenu la forme du casque, et de sa grande série de fabrication, le procédé de fabrication le plus adapté et le plus économique est le moulage, c'est d'ailleurs le procédé utilisé dans l'industrie du casque)
- FC7 : Doit répondre aux normes de sécurité en vigueur

- Indices de performances :

- Indices mécaniques : la fonction première du matériau est d'absorber l'énergie du choc. Les indices de cette fonction sont identiques à ceux trouvés dans le cas du gilet pare-balles et dans la calotte extérieure du casque de moto, car ces objets ont la même fonction :
 1. indice I_1 : pour l'absorption d'énergie par déformation élastique $I_1 = \sigma_e^2/E$
 2. indice I_2 : pour l'absorption de l'énergie par déformation plastique $I_2 = K_{IC}$
- Indices liés à la géométrie : le matériau final doit pouvoir convenir à la géométrie du casque. A cette fin, son volume par exemple ne doit pas dépasser les dimensions d'un casque. Nous recherchons donc les densités maximales et minimales qui permettent au matériau final d'avoir un volume adéquat pour le casque. Pour cela, nous considérons un casque de 1,3 kg (masse maximum d'un casque) dont le volume intérieur est de 1350 cm³ (volume moyen de la tête humaine) :

1. Densité maximale d'un matériau potentiel ρ_{max} : dans le cas où le volume du casque est totalement rempli de matériau de rembourrage
2. Densité minimale d'un matériau potentiel ρ_{min} : dans les cas où le rembourrage de protection représente 50% du volume du casque.

$$\rho_{max} = \frac{\text{Masse du casque}}{\text{Volume intérieur du casque}} = \frac{1,3}{0,00135} = 963 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_{min} = \frac{\text{Masse du casque}}{\text{Volume intérieur du casque}} = \frac{0,65}{0,00135} = 481 \text{ Kg/m}^3$$

- Choix des matériaux – cartes de sélection: compte tenu des indices de performance précédemment déterminés, on se propose de tracer les cartes suivantes :

- Limite d'élasticité en fonction du module d'Young (indice I_1), puis grâce à la fonction TREE STAGE nous éliminons tous les matériaux qui ne peuvent pas être moulés, car on considère le moulage comme le procédé de fabrication (procédé le plus adapté compte tenu de la forme du casque et d'une fabrication en grande série, et celui employé dans l'industrie).
- Ténacité en fonction de la masse volumique (indice I_2), afin de tenir compte de l'absorption des chocs par déformation plastique, car le matériau final doit également avoir cette propriété. C'est justement à cause de la déformation plastique des matériaux intérieurs du casque qu'il est conseillé de changer de casque après un accident.
- On applique enfin la fonction « LIMIT STAGE » pour se restreindre aux matériaux dont la densité est comprise entre 481 kg/m^3 et 983 kg/m^3 .

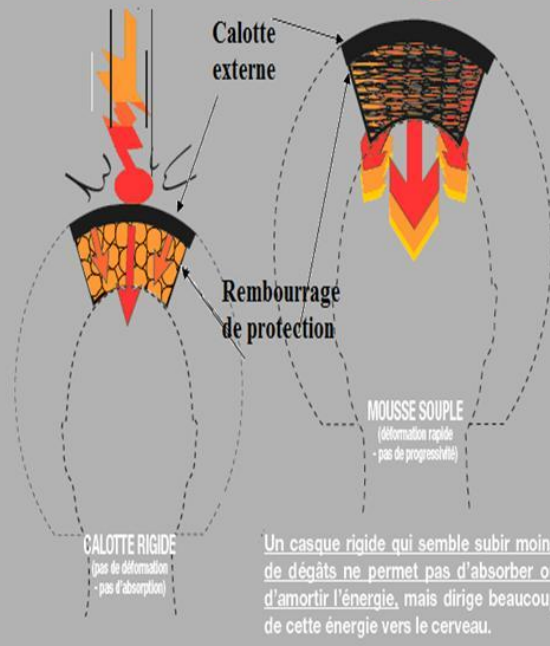
On constate d'abord que les matériaux élastomères ont une faible ténacité ce qui traduit une mauvaise absorption des chocs par déformation plastique. On va donc éliminer ces matériaux pour le choix final.

De façon claire nous trouvons que le meilleur matériau pour le rembourrage de protection est l'éthylène/acrylate d'éthyle (EEA). Cependant, dans l'industrie du casque le matériau couramment utilisé est polystyrène expansé. Celui-ci est un peu moins performant que l'EEA mais il a l'avantage d'être moins cher.

Les casques de motos ont beaucoup évolué depuis leur apparition et sont devenus très complexes. Ainsi afin d'améliorer le contrôle des chocs de nos jours, l'intérieur des casques les plus perfectionnés sont munis d'amortisseurs internes de densité variable. En effet, pour une meilleure protection, dans les casques les plus perfectionnés, les calottes extérieures de même que le rembourrage intérieur de protection changent de densité selon la zone où l'on se trouve sur le casque. Ainsi, lorsque la forme rend la coque extérieure plus rigide, l'amortisseur interne doit être plus souple, de même lorsque la forme rend la coque extérieure plus flexible (par exemple autour du champ de vision), l'amortisseur interne doit être plus rigide.

CASQUE DUR

CALOTTE RIGIDE + AMORTISSEUR SOUPLE



CALOTTE SOUPLE

