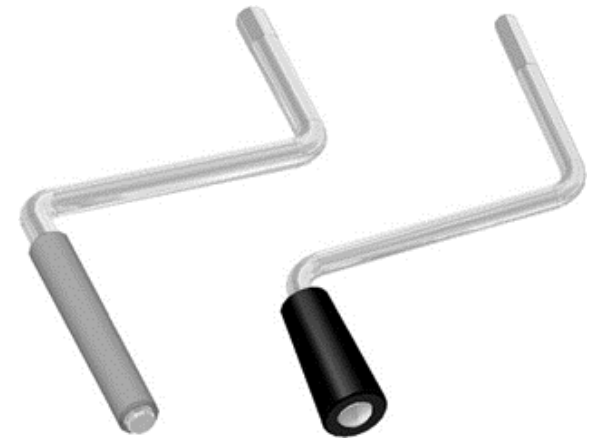


Eco-conception avec contrainte de résistance

TD-6 – Etude d'une manivelle

Démarche :

- Détailler la fonction de la pièce : transmettre un effort
 - Bilan des efforts extérieurs
 - Calcul des efforts aux liaisons
- Se donner un objectif de performance : énergie grise minimale et contribution à l'effet de serre minimale
- Expliciter les contraintes de fonctionnement : critère de résistance statique aux efforts
 - Calcul des efforts internes
 - Identification de la zone « critique »
 - Calcul des contraintes
 - Contrainte équivalente max
- Choix des matériaux performants



État de l'art des matériaux pour manivelle : Acier, Aluminium et Technopolymères



Nouveaux produits

ELEMENTS STANDARD MECANIQUES

ELEMENTS DE MANOEUVRE

Manivelles (Série 12)

MANIVELLE DROITE FONTE - DIN 469 (Modèle 12-01)

MANIVELLE DROITE ALUMINIUM (Modèle 12-07)

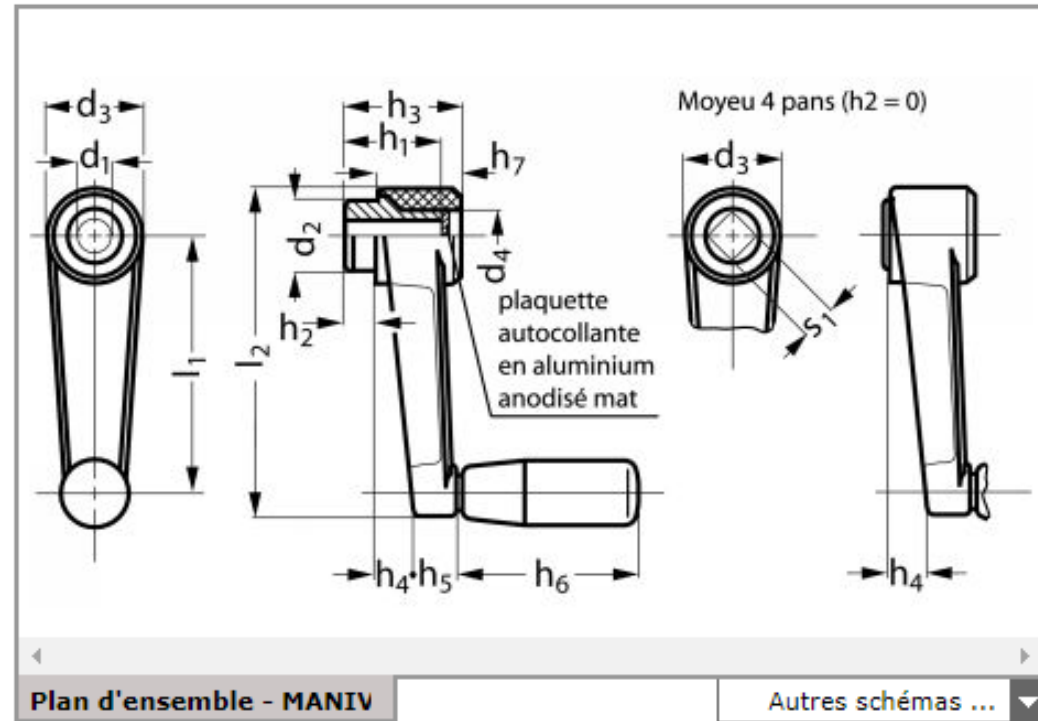
MANIVELLE DROITE ACIER (Modèle 12-13)

MANIVELLE DROITE INOX (Modèle 12-14)

MANIVELLE DROITE TECHNOPLYMÈRE (Modèle 12-15)

MANIVELLE DROITE TECHNOPLYMÈRE

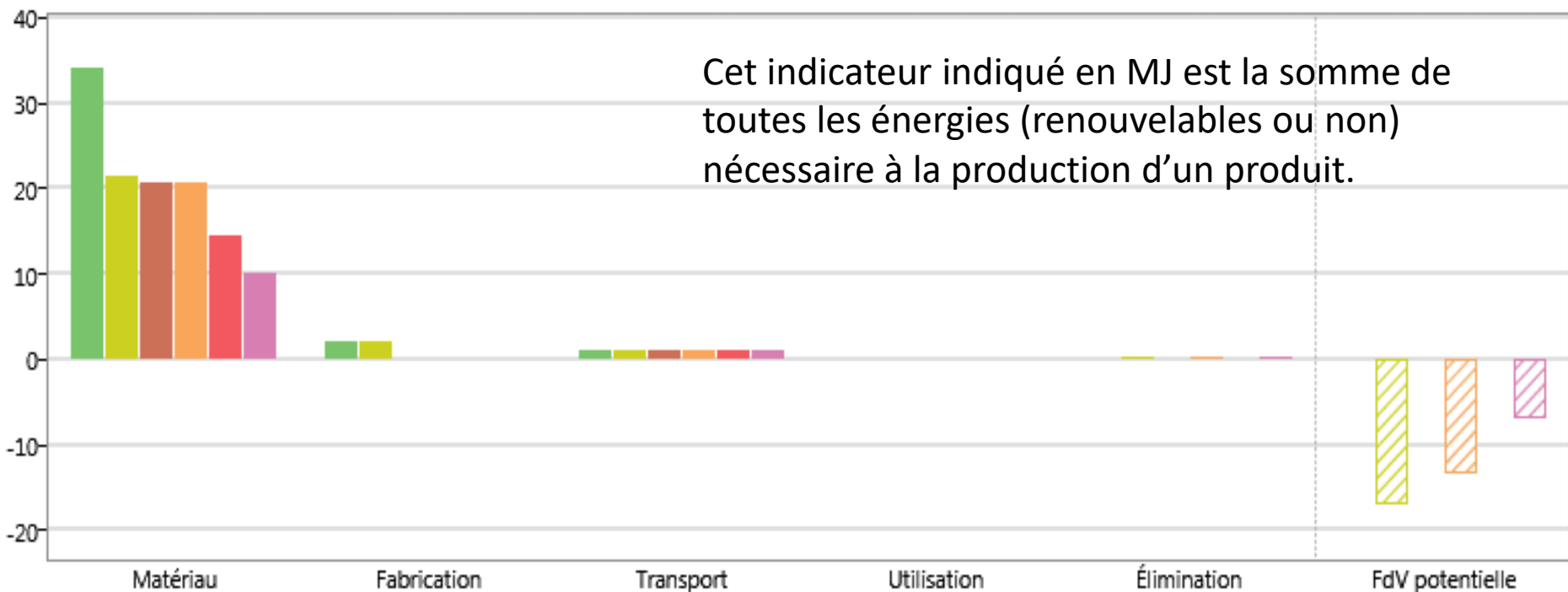
- Schémas
- Informations
- Documents
- Références



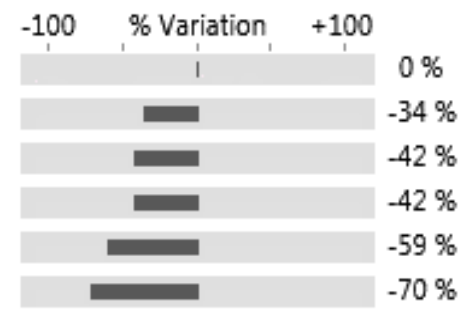
Exemples de technopolymères : polyamide, polypropylène, polycarbonate,...

Quantité	Dispo	Uv	Prix *	3D	Ref	Version	l1 (mm)	l2 (mm)	d1 (H7) (mm)
1	NC		NC		12-151-64	Moyeu alésé	64	86	8
1	NC		NC		12-151-80	Moyeu alésé	80	105	10

Rappel de cours : l'énergie grise

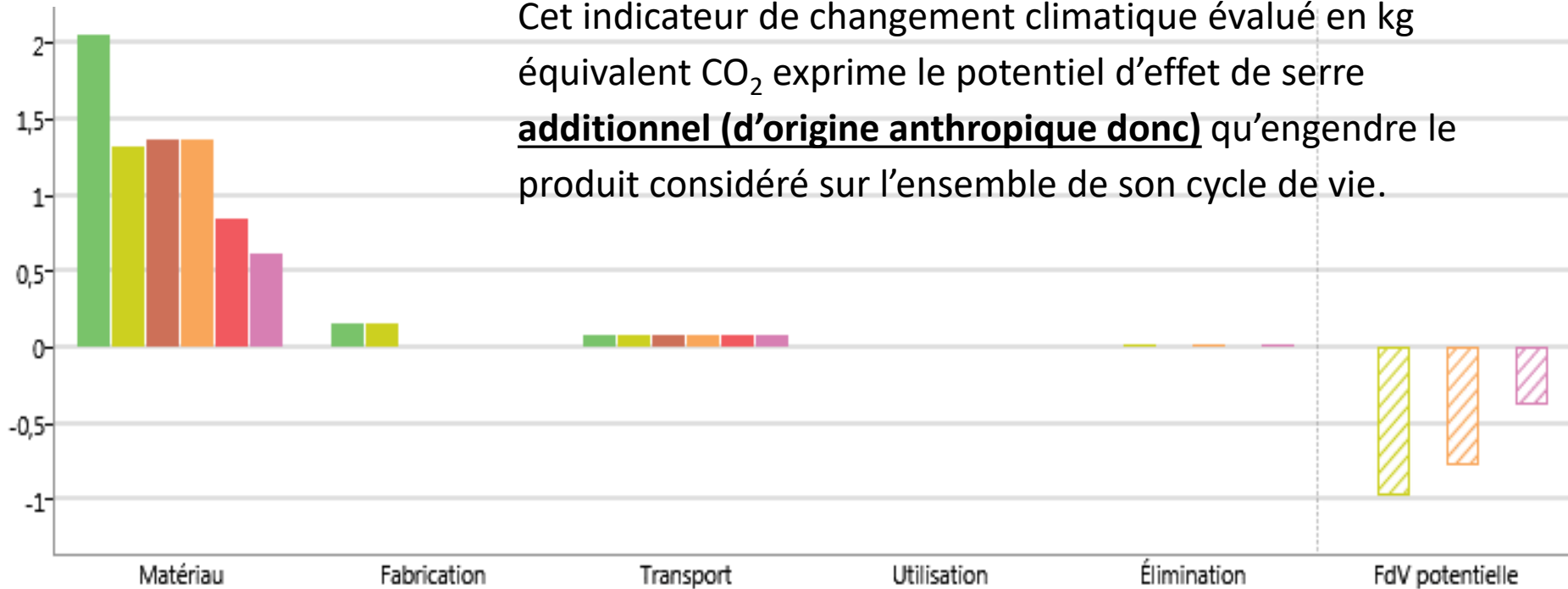


- manivelle aluminium non recyclé
- manivelle aluminium recyclé
- manivelle technopolymère non recyclé
- manivelle technopolymère recyclé
- manivelle inox non recyclé
- manivelle inox recyclé (1)

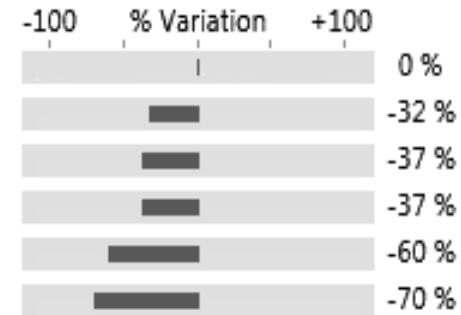


Rappel de cours : contribution à l'effet de serre

Cet indicateur de changement climatique évalué en kg équivalent CO₂ exprime le potentiel d'effet de serre **additionnel (d'origine anthropique donc)** qu'engendre le produit considéré sur l'ensemble de son cycle de vie.



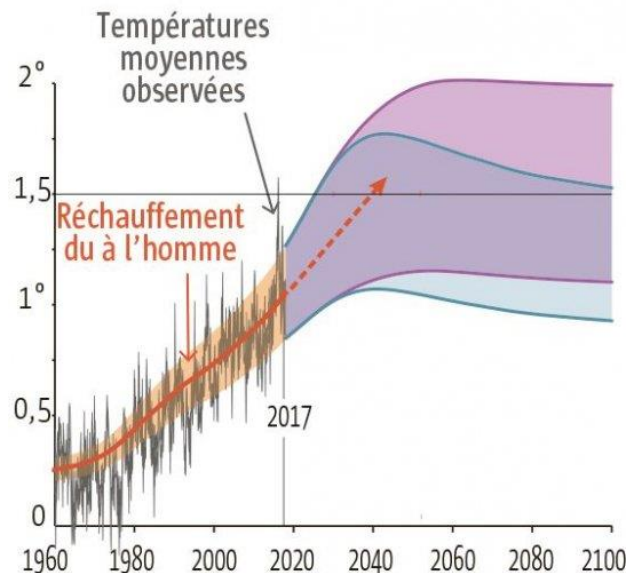
- manivelle aluminium non recyclé
- manivelle aluminium recyclé
- manivelle technopolymère non recyclé
- manivelle technopolymère recyclé
- manivelle inox non recyclé
- manivelle inox recyclé (1)



A ce sujet... le rapport du GIEC du 8/10/2018







L'élévation des températures



Une rapide réduction d'émission de CO₂ induit une forte probabilité de limitation d'augmentation des températures à 1,5 degré

La non réduction forcée d'émission de CO₂ induit une faible probabilité de limitation d'augmentation des températures limitée à 1,5 degré

Entre 1,5° et 2° de réchauffement, la différence d'impact est énorme

	+ 1,5°	+ 2°
Banquise arctique 	Un été sans banquise... ...par siècle	...tous les dix ans
Coraux 	Disparition des récifs coralliens... ...70% à 90 %	...quasi intégrale
Vagues de chaleur 	Latitudes moyennes + 3° Nuits froides plus chaudes de 4,5°	+ 4° Nuits froides plus chaudes de 6°
Perte de la biodiversité 	4 % des vertébrés 6 % des insectes 8 % des plantes	8 % des vertébrés 18 % des insectes 16 % des plantes

Et ma petite manivelle dans tout ça ?

Elle n'est pas seule ! Exemple : en 2017, le consortium américain Stanley Black & Decker, producteur d'outillage, a produit **20 millions d'outils à main** rien qu'en France avec ses 447 salariés.

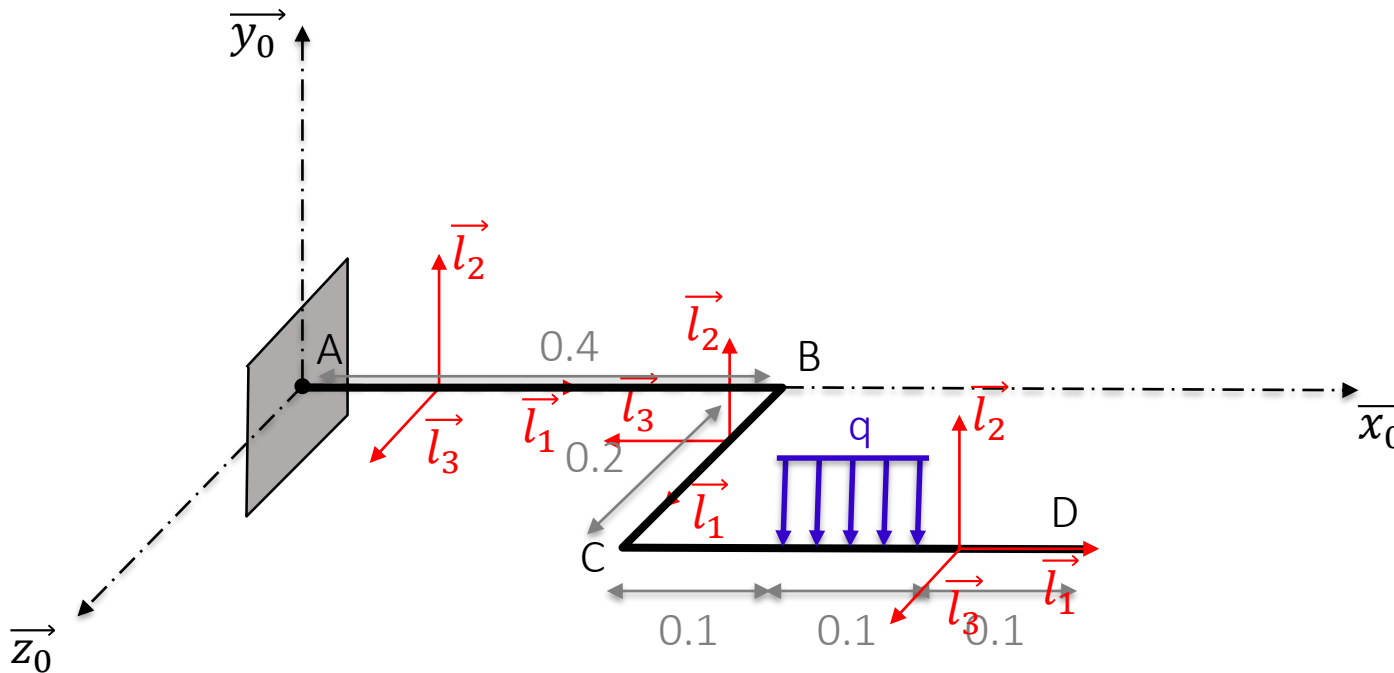


Si chaque outil avait été éco-conçu, quel diminution globale des impacts aurait-on pu atteindre ? On va en avoir une idée avec notre manivelle.



Fonction : transmettre un effort de la main au point A

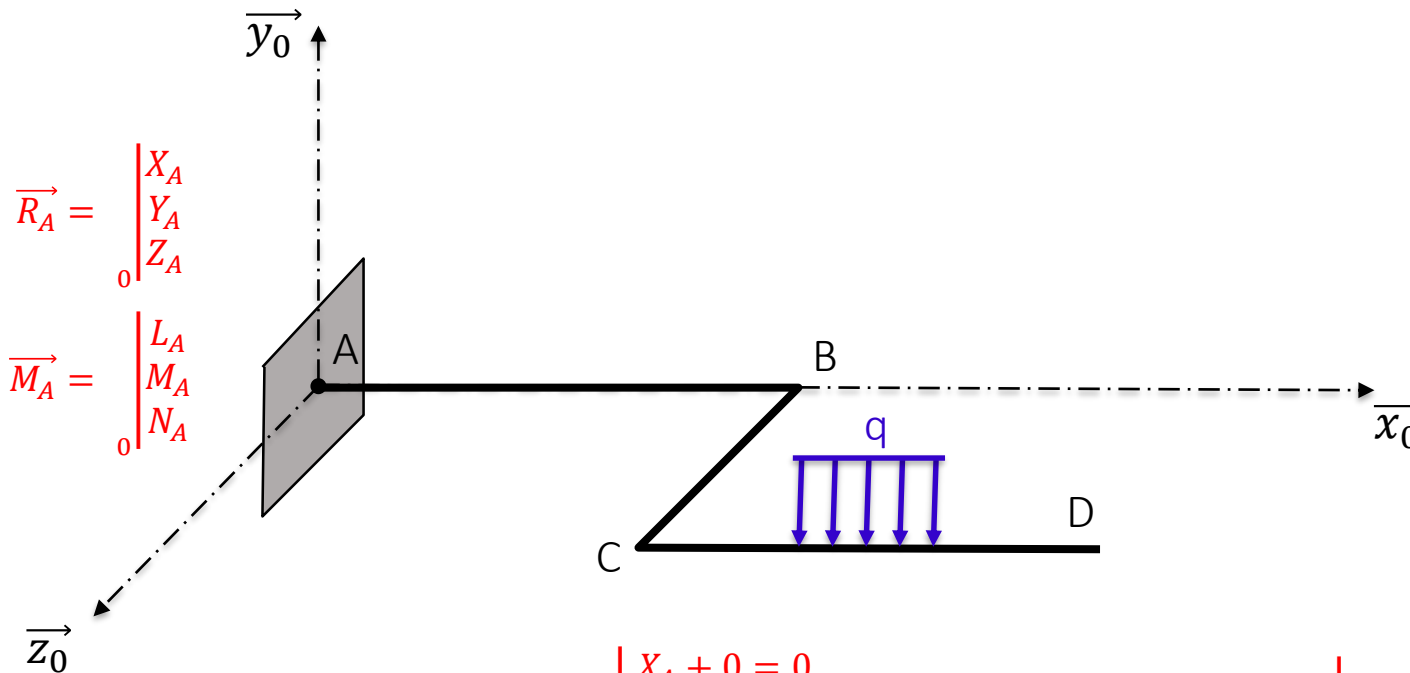
- Repère global, repères locaux liés à la structure



Données pour les applications numériques : $d=20\text{mm}$, $q=5000\text{ N/m}$, $l=0.1\text{m}$,

Fonction : transmettre un effort de la main au point A

- Q1 : PFS appliqué à la manivelle en A.



$$\vec{R}_A = \begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{M}_A = \begin{pmatrix} L_A \\ M_A \\ N_A \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\sum \vec{F}_{ext} = \vec{0} = \begin{pmatrix} X_A + 0 = 0 \\ Y_A - q \cdot l = 0 \\ Z_A + 0 = 0 \end{pmatrix}$$

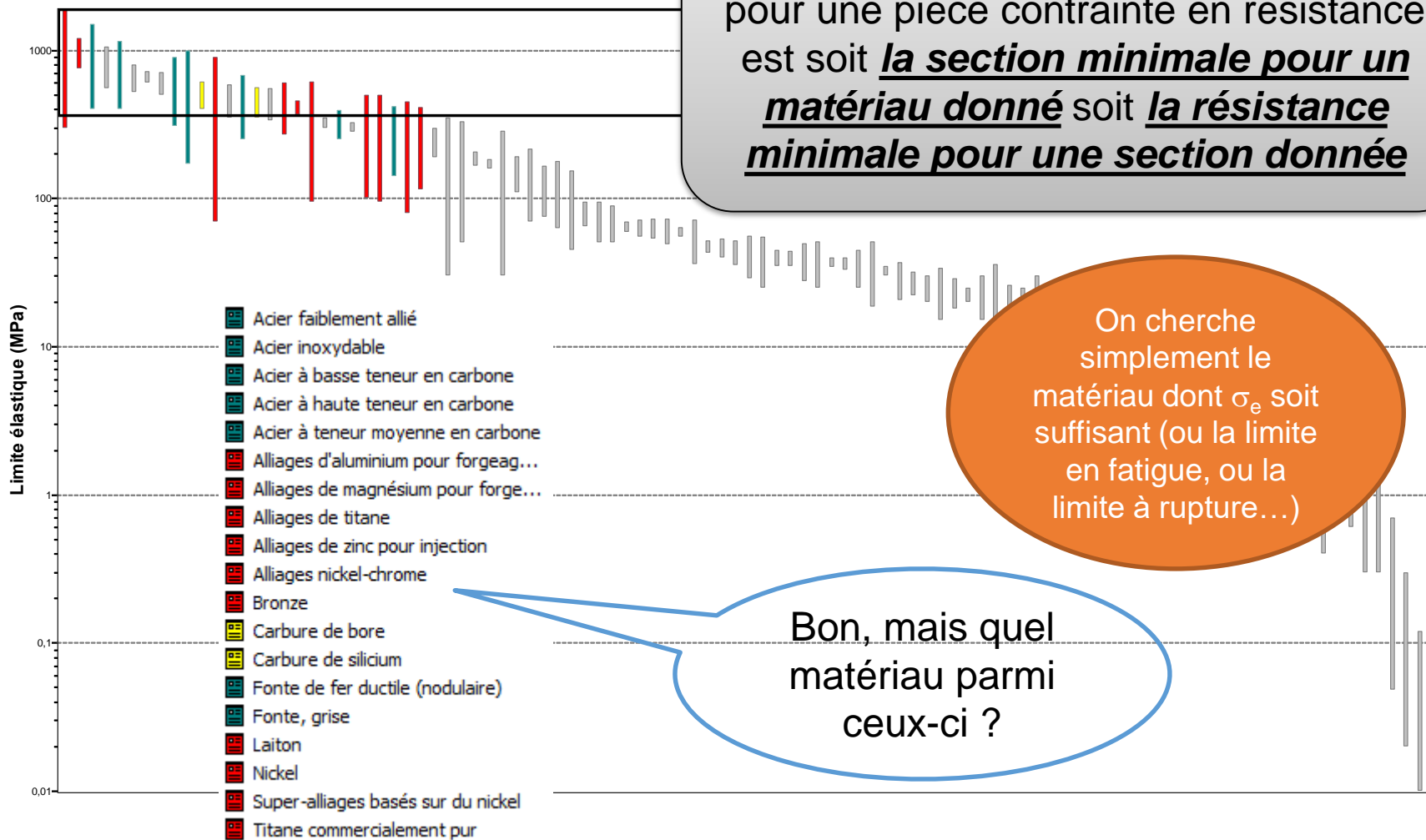
$$\vec{R}_A = \begin{pmatrix} X_A = 0 \\ Y_A = q \cdot l = 500 \text{ N} \\ Z_A = 0 \end{pmatrix}$$

$$\sum \vec{M}_{ext}(A) = \vec{0} = \begin{pmatrix} L_A + ql * 2l = 0 \\ M_A + 0 = 0 \\ N_A - ql * 11l/2 = 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{M}_A = \begin{pmatrix} L_A = -2ql^2 = -100 \text{ N.m} \\ M_A = 0 \\ N_A = ql^2 * 11/2 = 275 \text{ N.m} \end{pmatrix}$$

Objectif de performance

L'objectif « scolaire » d'une conception pour une pièce contrainte en résistance est soit **la section minimale pour un matériau donné** soit **la résistance minimale pour une section donnée**



On cherche simplement le matériau dont σ_e soit suffisant (ou la limite en fatigue, ou la limite à rupture...)

Bon, mais quel matériau parmi ceux-ci ?

Objectif de performance

Nom	masse (kg)	prix (euros)	CO2 (kg)	Energie gr (MJ)
Acier à basse teneur en carbone	2,22	1,50	4,51	6
Acier à haute teneur en carbone	2,22	11,63	11,05	187,66
Acier à teneur moyenne en carbone	2,22	1,40	4,02	58,48
Acier faiblement allié	2,22	1,40	4,00	59,15
Acier inoxydable	2,22	1,40	4,02	58,71
Alliages d'aluminium pour forgeage et laminage susceptibles de durcissement par traitement thermique	0,76	1,33	9,77	159,17
Alliages de magnésium pour forgeage et lamination	0,49	1,23	17,24	150,7
Alliages de titane	1,30	25,32	60,35	891,57
Alliages de zinc pour injection	1,69	3,51	6,93	101,70
Alliages nickel	2,38	30,96	27,31	111,79
Bronze	2,47	14,34	10,34	111,79
Carbure de bore	0,69	46,23	6,00	111,79
Carbure de silicium	0,89	14,08	5,86	65,92
Fonte de fer ductile (nodulaire)	2,02	0,78	3,54	40,43
Fonte, grise	2,02	0,79	3,44	38
Laiton	2,33	9,70	8,28	127,79
Nickel	2,51	20,24	29,03	431,08
Super	2,32	33,79	31,76	539,05
Titane commercialement pur	1,28	15,41	49,80	735,77

Supposons que nous pouvons fabriquer la manivelle dans tous ces matériaux. Laquelle prendre ? La moins chère ? La plus légère ? La moins polluante ?

Sans objectif de performance, le choix n'est guère pertinent!

Expliciter les contraintes de conception

On mobilise nos connaissances scientifiques pour trouver un modèle permettant d'exprimer une relation entre la fonction (les efforts à transmettre) et la géométrie

La fonction est décrite en critère et niveaux, ici des efforts

$$\begin{aligned}\sigma_{11} &= \frac{N}{S} + \frac{M_2}{I_{22}}x_3 - \frac{M_3}{I_{33}}x_2 \\ \sigma_{12} &= \frac{T_2}{S} - \frac{M_1}{I_{11}}x_3 \\ \sigma_{13} &= \frac{T_3}{S} + \frac{M_1}{I_{11}}x_2\end{aligned}$$

La capacité à transmettre des efforts dépend du volume et de la disposition de la matière

On mobilise nos connaissances technologiques pour déterminer un critère pertinent de validation du matériau

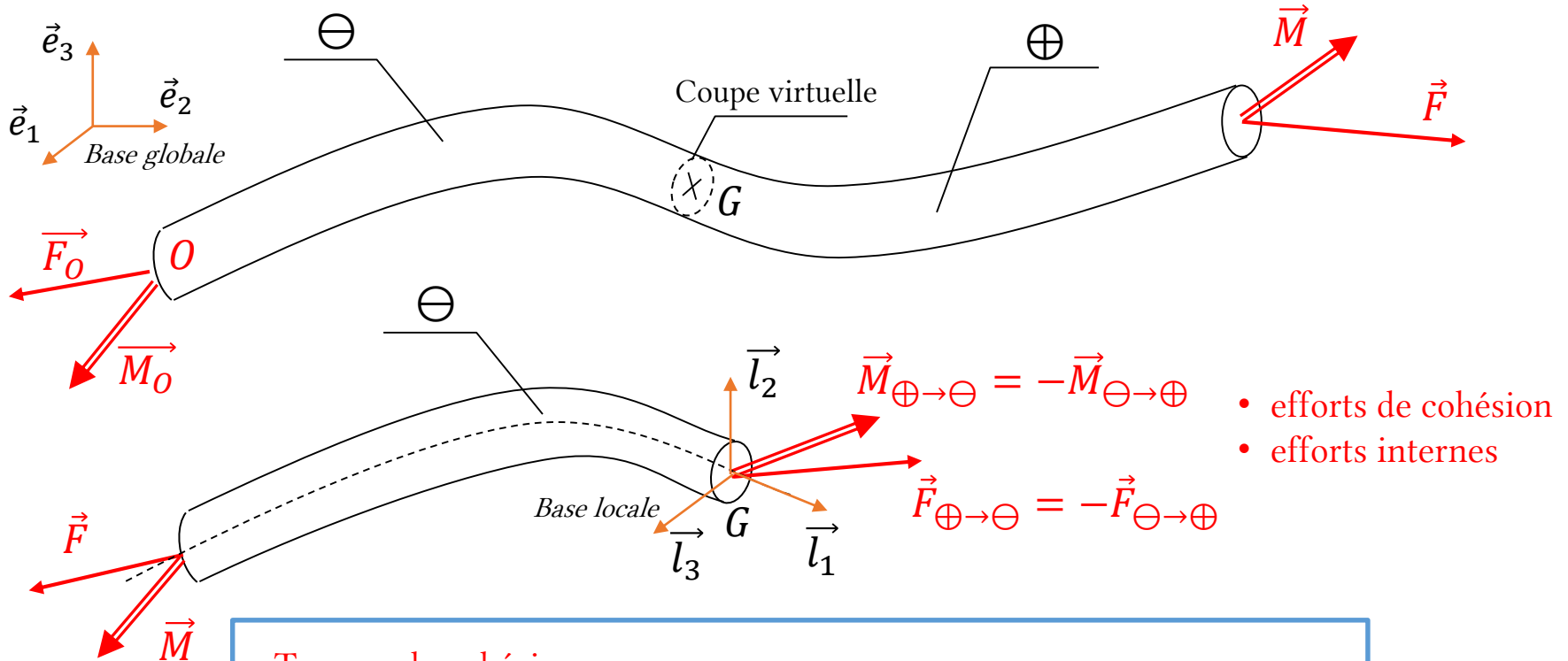
$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_{11}^2 + 3(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2)} < \sigma_e$$

La contrainte admissible dépend du matériau

Calcul des efforts intérieurs, torseurs de cohésion

On peut toujours couper un solide virtuellement (= de manière fictive) et regarder ce qui se passe à l'intérieur de la matière...

Dans le cas des poutres on calcule les **efforts de cohésion** (ou **efforts internes**).



- efforts de cohésion
- efforts internes

Torseur de cohésion

$$\{\mathcal{J}_{\oplus \rightarrow \ominus}\} = \begin{Bmatrix} N_1 & M_1 \\ T_2 & M_2 \\ T_3 & M_3 \end{Bmatrix} [G, \vec{l}_1, \vec{l}_2, \vec{l}_3]$$

Base propre des moments quadratiques

N_1 : effort normal

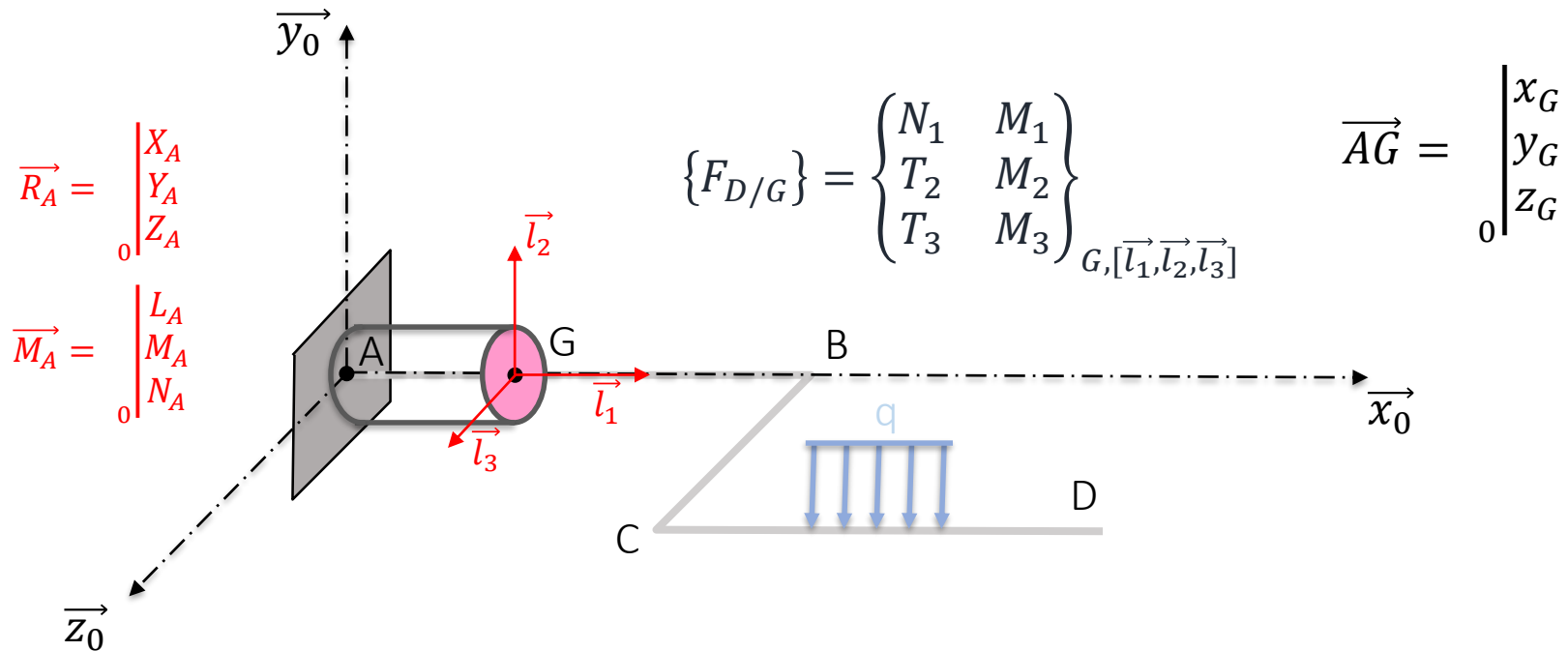
$T_{2,3}$: efforts tranchants

M_1 : moment de torsion

$M_{2,3}$: moments de flexion

Calcul des efforts intérieurs, torseurs de cohésion

- Q2 : On garde la partie gauche, PFS en G

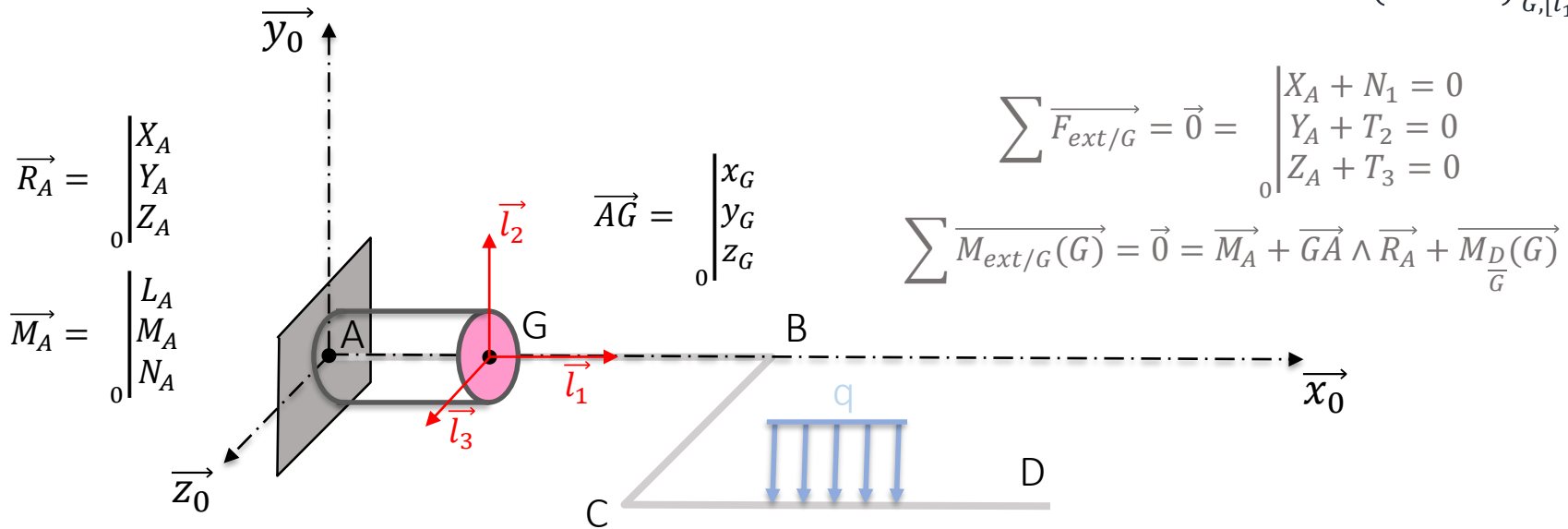


- On considère successivement les parties AB, BC, CD

Calcul des efforts intérieurs, torseurs de cohésion

- Q3 : On garde la partie gauche, PFS en G

$$\{F_{D/G}\} = \begin{Bmatrix} N_1 & M_1 \\ T_2 & M_2 \\ T_3 & M_3 \end{Bmatrix}_{G, [\vec{l}_1, \vec{l}_2, \vec{l}_3]}$$



$$\sum \vec{M}_{ext/G}(G) = \vec{0} = \vec{M}_A + \vec{GA} \wedge \vec{R}_A + \vec{M}_{\frac{D}{G}}(G)$$

$$= \begin{Bmatrix} L_A = -2ql^2 \\ M_A = 0 \\ N_A = ql^2 * 11/2 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -x_G \\ -y_G \wedge \\ -z_G \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} X_A = 0 \\ Y_A = q \cdot l = 500 \text{ N} \\ Z_A = 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

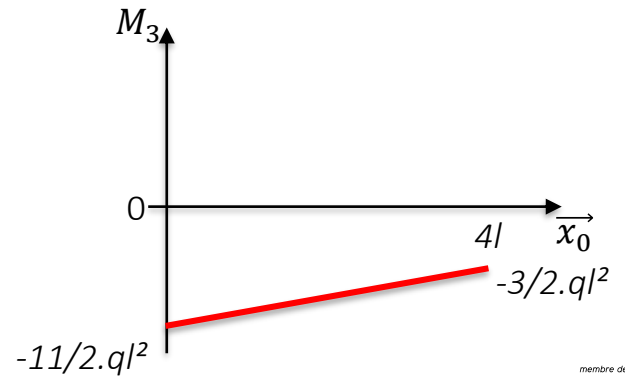
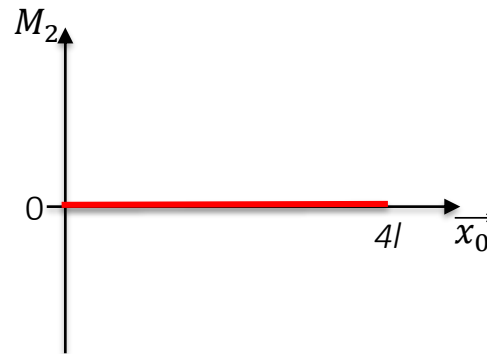
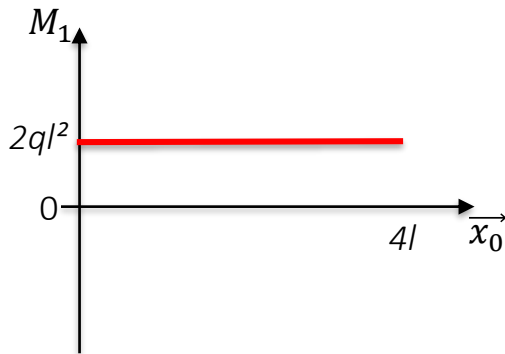
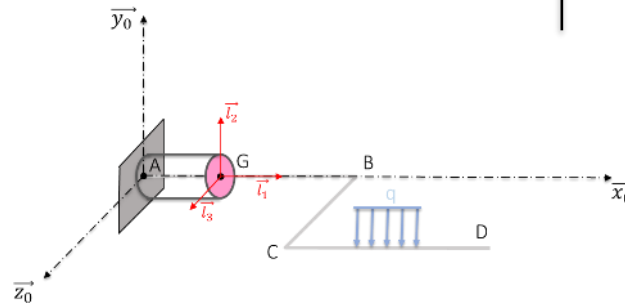
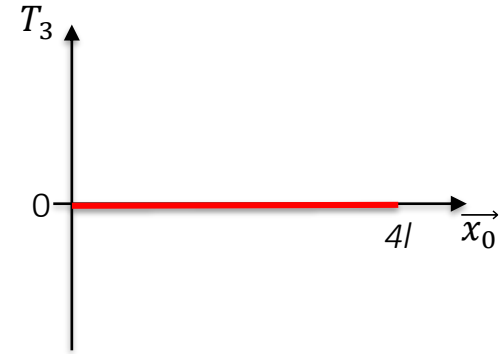
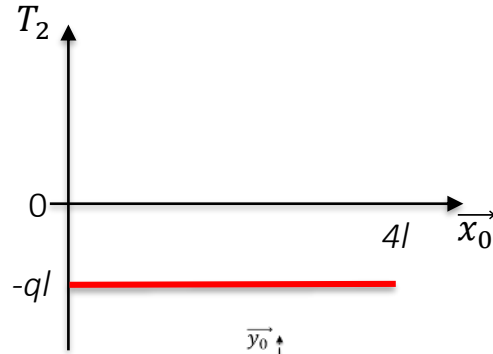
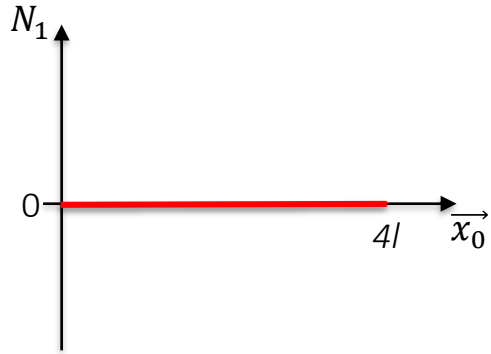
$$\vec{R}_{D/G} = \begin{Bmatrix} N_1 = 0 \\ T_2 = -q \cdot l = -500 \text{ N} \\ T_3 = 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\vec{M}_{\frac{D}{G}}(G) = \begin{Bmatrix} M_1 = 2ql^2 = 100 \text{ N.m} \\ M_2 = 0 \\ M_3 = -ql^2 * 11/2 + x_G \cdot q \cdot l \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Calcul des efforts intérieurs, torseurs de cohésion

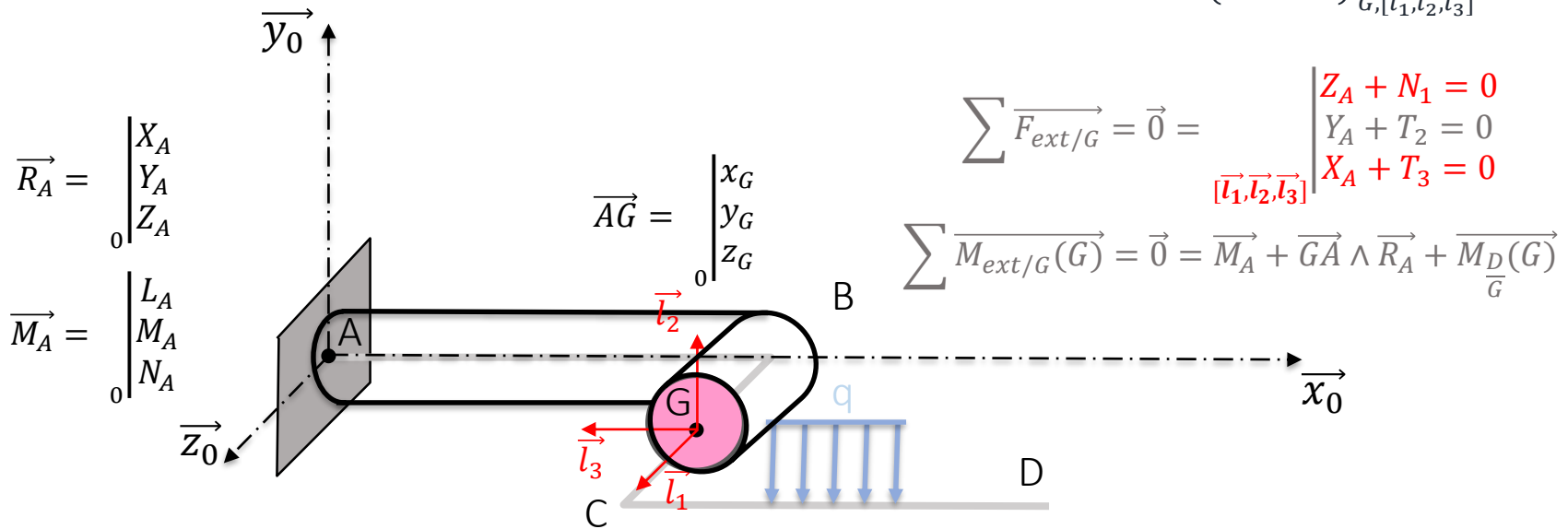
- AB, Graphes, section critique

$$\{F_{D/G}\} = \begin{Bmatrix} N_1 & M_1 \\ T_2 & M_2 \\ T_3 & M_3 \end{Bmatrix}_{G, [\vec{l}_1, \vec{l}_2, \vec{l}_3]}$$



Calcul des efforts intérieurs, torseurs de cohésion

- On garde la partie gauche, PFS en G $\{F_{D/G}\} = \begin{Bmatrix} N_1 & M_1 \\ T_2 & M_2 \\ T_3 & M_3 \end{Bmatrix}_{G, [\vec{l}_1, \vec{l}_2, \vec{l}_3]}$



$$\sum \vec{M}_{ext/G}(G) = \vec{0} = \vec{M}_A + \vec{GA} \wedge \vec{R}_A + \vec{M}_{\frac{D}{G}}$$

$$= \begin{Bmatrix} L_A = -2ql^2 \\ M_A = 0 \\ N_A = ql^2 * 11/2 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -x_G \\ -y_G \\ -z_G \\ 0 \end{Bmatrix} \wedge \begin{Bmatrix} X_A = 0 \\ Y_A = q \cdot l = 500 \text{ N} \\ Z_A = 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -M_3 \\ M_2 \\ M_1 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

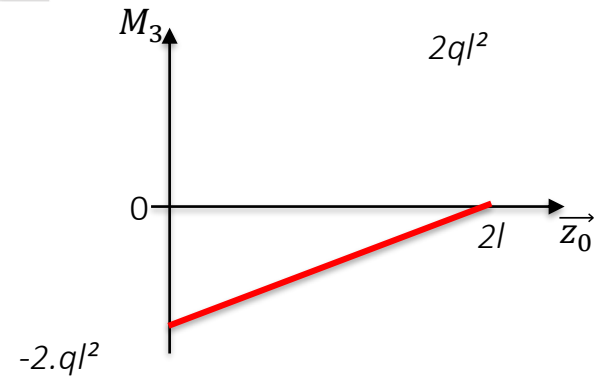
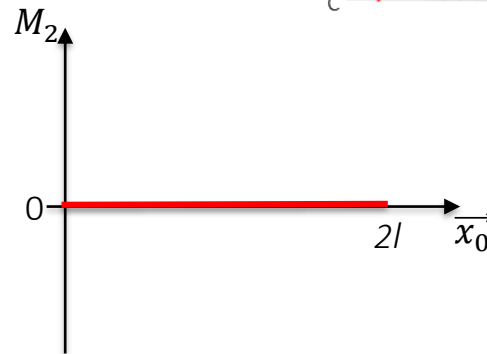
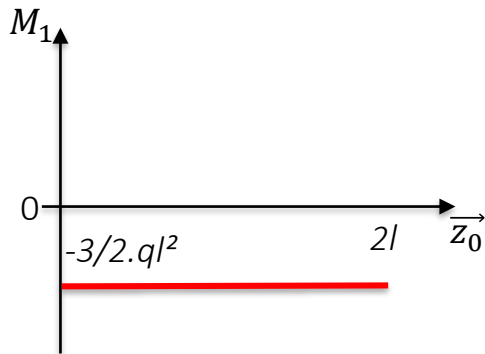
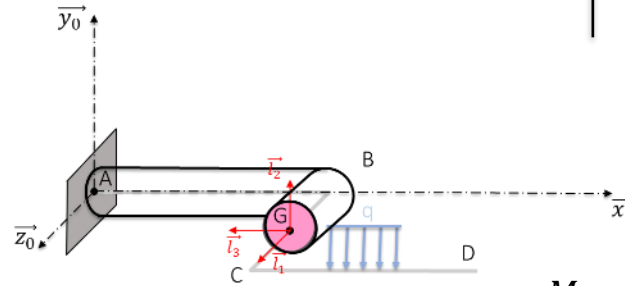
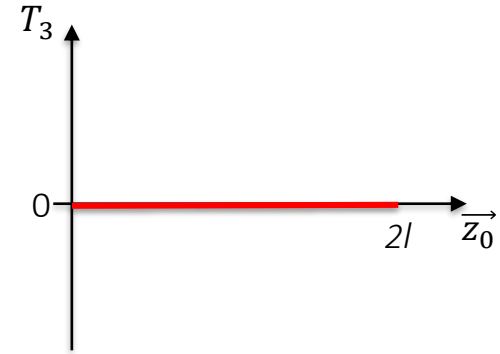
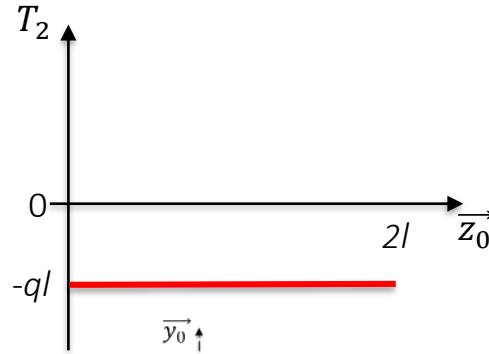
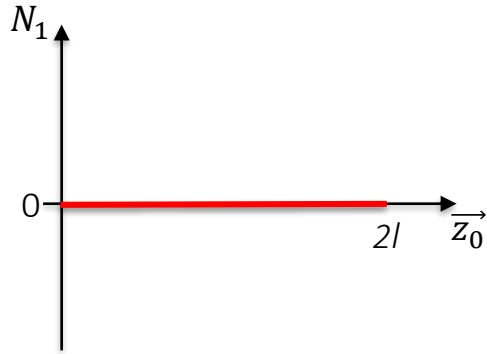
$$\vec{R}_{D/G} = \begin{Bmatrix} N_1 = 0 \\ T_2 = -q \cdot l = -500 \text{ N} \\ T_3 = 0 \\ 0 \end{Bmatrix}_{[\vec{l}_1, \vec{l}_2, \vec{l}_3]}$$

$$\vec{M}_{\frac{D}{G}} = \begin{Bmatrix} M_1 = -ql^2 \cdot 3/2 \\ M_2 = 0 \\ M_3 = -2ql^2 + z_G \cdot q \cdot l = -100 \text{ N.m} + z_G \cdot q \cdot l \\ 0 \end{Bmatrix}_{[\vec{l}_1, \vec{l}_2, \vec{l}_3]}$$

Calcul des efforts intérieurs, torseurs de cohésion

- BC, Graphes, section critique

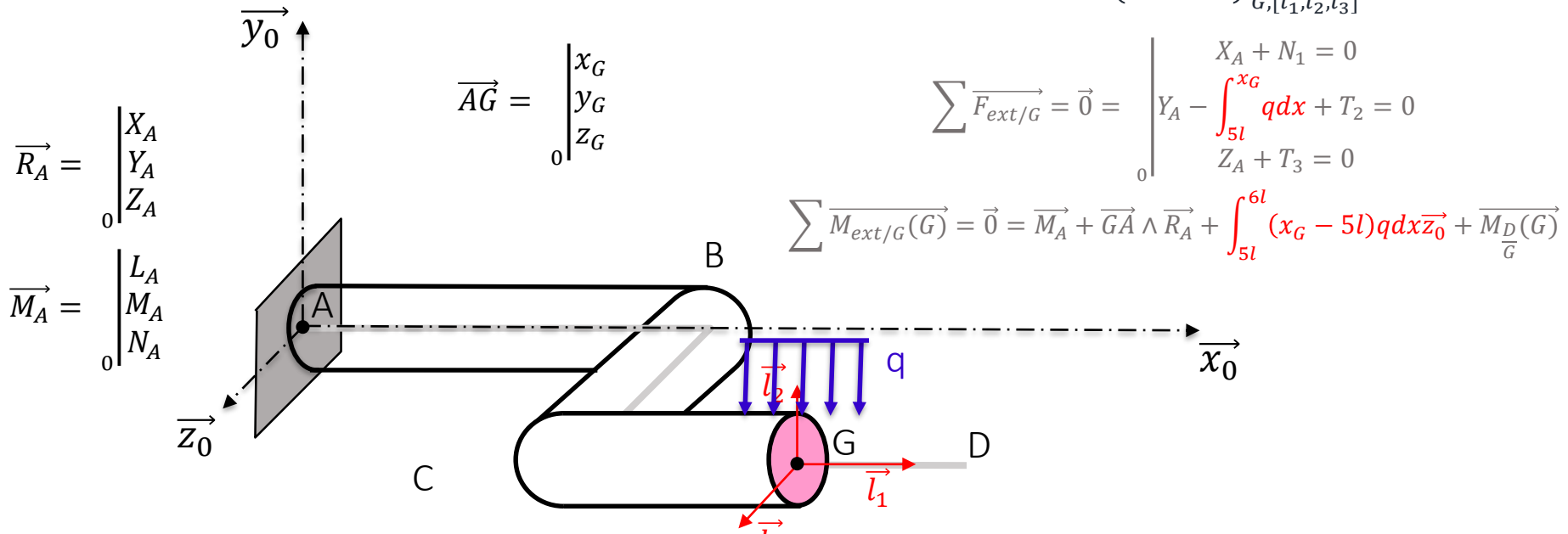
$$\{F_{D/G}\} = \begin{Bmatrix} N_1 & M_1 \\ T_2 & M_2 \\ T_3 & M_3 \end{Bmatrix}_{G, [\vec{l}_1, \vec{l}_2, \vec{l}_3]}$$



Calcul des efforts intérieurs, torseurs de cohésion

- On garde la partie gauche, PFS en G

$$\{F_{D/G}\} = \begin{Bmatrix} N_1 & M_1 \\ T_2 & M_2 \\ T_3 & M_3 \end{Bmatrix}_{G, [\vec{l}_1, \vec{l}_2, \vec{l}_3]}$$



$$\sum \vec{F}_{ext/G} = \vec{0} = \begin{cases} X_A + N_1 = 0 \\ Y_A - \int_{5l}^{x_G} q dx + T_2 = 0 \\ Z_A + T_3 = 0 \end{cases}$$

$$\sum \vec{M}_{ext/G}(G) = \vec{0} = \vec{M}_A + \vec{GA} \wedge \vec{R}_A + \int_{5l}^{6l} (x_G - 5l) q dx \vec{z}_0 + \vec{M}_{D/G}$$

$$\begin{aligned} \sum \vec{M}_{ext/G}(G) = \vec{0} &= \vec{M}_A + \vec{GA} \wedge \vec{R}_A + \vec{M}_{D/G} \\ &= \begin{vmatrix} L_A \\ 0 \\ N_A \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} -x_G \\ -y_G \\ -z_G \end{vmatrix} \wedge \begin{vmatrix} 0 \\ Y_A \\ 0 \end{vmatrix} + \int_{5l}^{6l} (x_G - 5l) q dx \vec{z}_0 + \begin{vmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{vmatrix} \end{aligned}$$

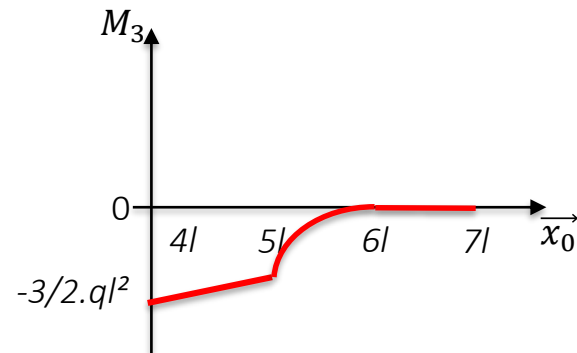
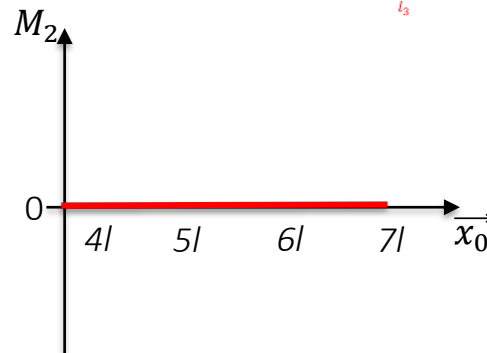
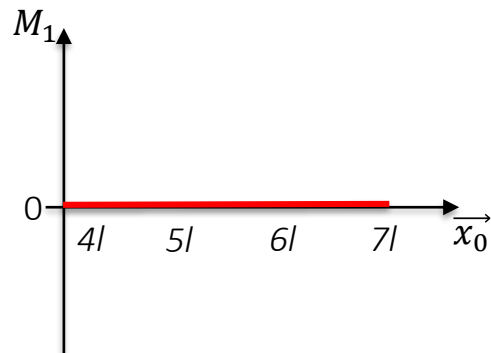
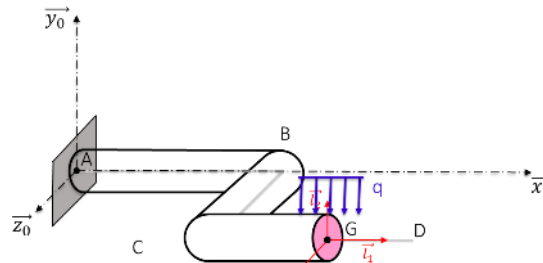
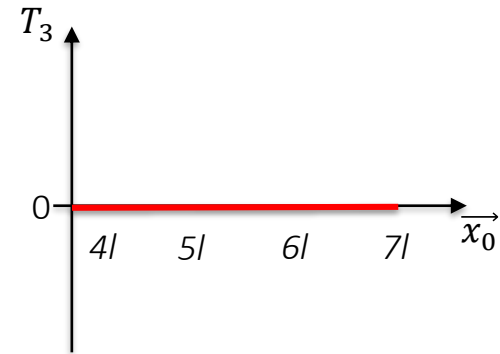
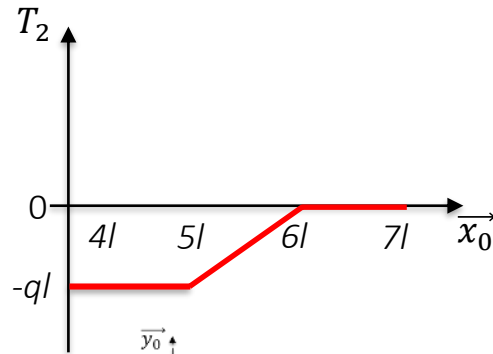
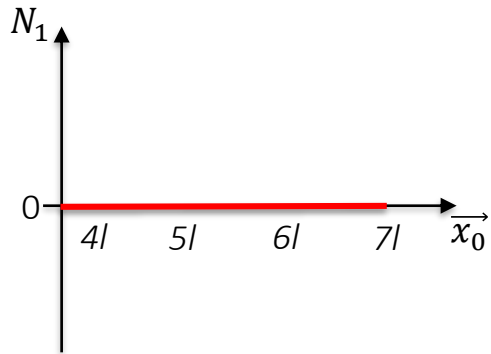
$$\vec{R}_{D/G} = \begin{vmatrix} N_1 = 0 \\ T_2 = -q \cdot l + \int_{5l}^{x_G} q dx \\ T_3 = 0 \end{vmatrix}$$

$$\vec{M}_{D/G} = \begin{vmatrix} M_1 = 0 \\ M_2 = 0 \\ M_3 = -ql^2 * 11/2 + x_G \cdot q \cdot l - \int_{5l}^{6l} (x_G - 5l) q dx \end{vmatrix}$$

Calcul des efforts intérieurs, torseurs de cohésion

- CD, Graphes, section critique

$$\{F_{D/G}\} = \begin{Bmatrix} N_1 & M_1 \\ T_2 & M_2 \\ T_3 & M_3 \end{Bmatrix}_{G, [\vec{l}_1, \vec{l}_2, \vec{l}_3]}$$



Rappel : relations torseur de cohésion/contraintes

Démarche conception

$$\sigma_{11} = \frac{N}{S} + \frac{M_2}{I_{22}} x_3 - \frac{M_3}{I_{33}} x_2 \quad \sigma_{12} = \frac{T_2}{S} - \frac{M_1}{I_{11}} x_3 \quad \sigma_{13} = \frac{T_3}{S} + \frac{M_1}{I_{11}} x_2$$

$$\left\{ \begin{array}{l} N_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{array} \right\} [G, \vec{l}_1, \vec{l}_2, \vec{l}_3] \quad \longleftrightarrow \quad \sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{13}$$

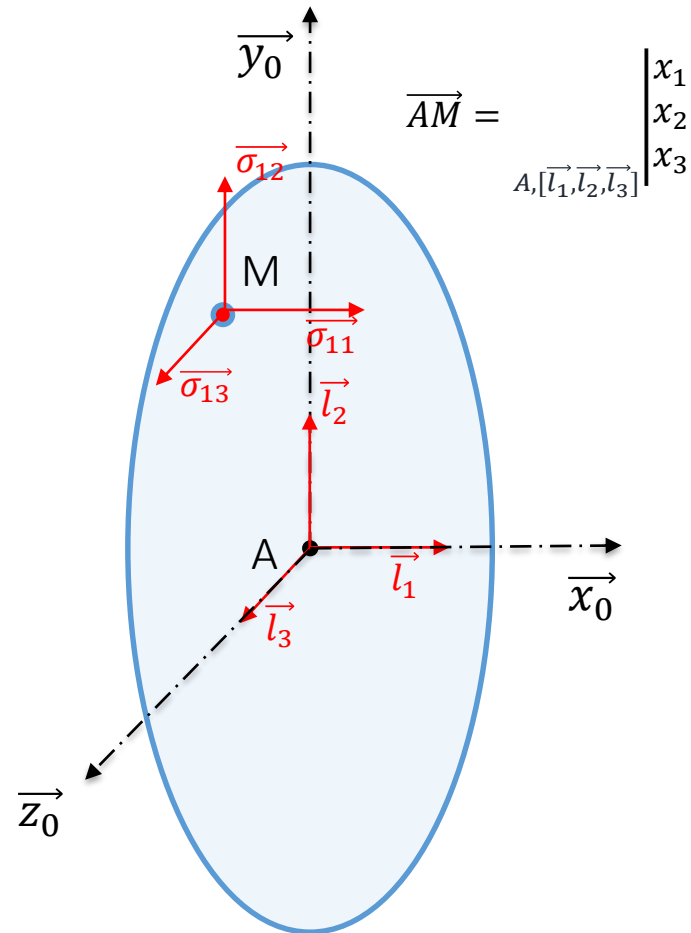
$$N_1 = \int_S \sigma_{11} dS \quad M_1 = \int_S x_2 \sigma_{13} - x_3 \sigma_{12} dS$$

$$T_2 = \int_S \sigma_{12} dS \quad M_2 = \int_S x_3 \sigma_{11} dS$$

$$T_3 = \int_S \sigma_{13} dS \quad M_3 = - \int_S x_2 \sigma_{11} dS$$

Q4 : Contraintes dans la section critique A

$$\left\{ \begin{array}{ll} N_1 = 0 & M_1 = 100N.m \\ T_2 = -500N & M_2 = 0 \\ T_3 = 0 & M_3 = 275N.m \end{array} \right\}_{[A, \vec{l}_1, \vec{l}_2, \vec{l}_3]}$$



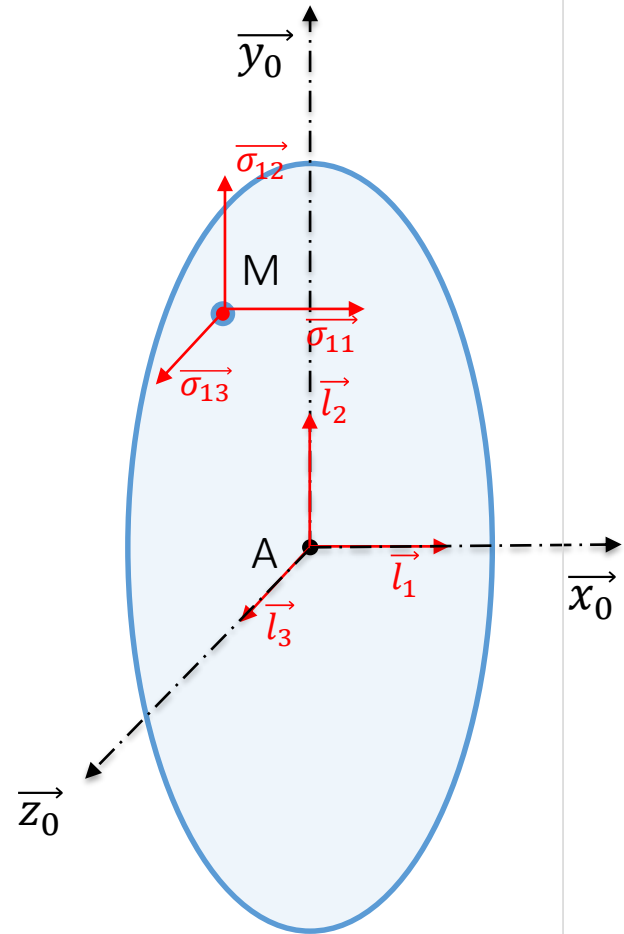
$$S = \frac{\pi d^2}{4} = 314 \text{ mm}^2 = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$I_{22,33} = \frac{\pi d^4}{64} = 7,854 \cdot 10^3 \text{ mm}^4 = 7,854 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$$

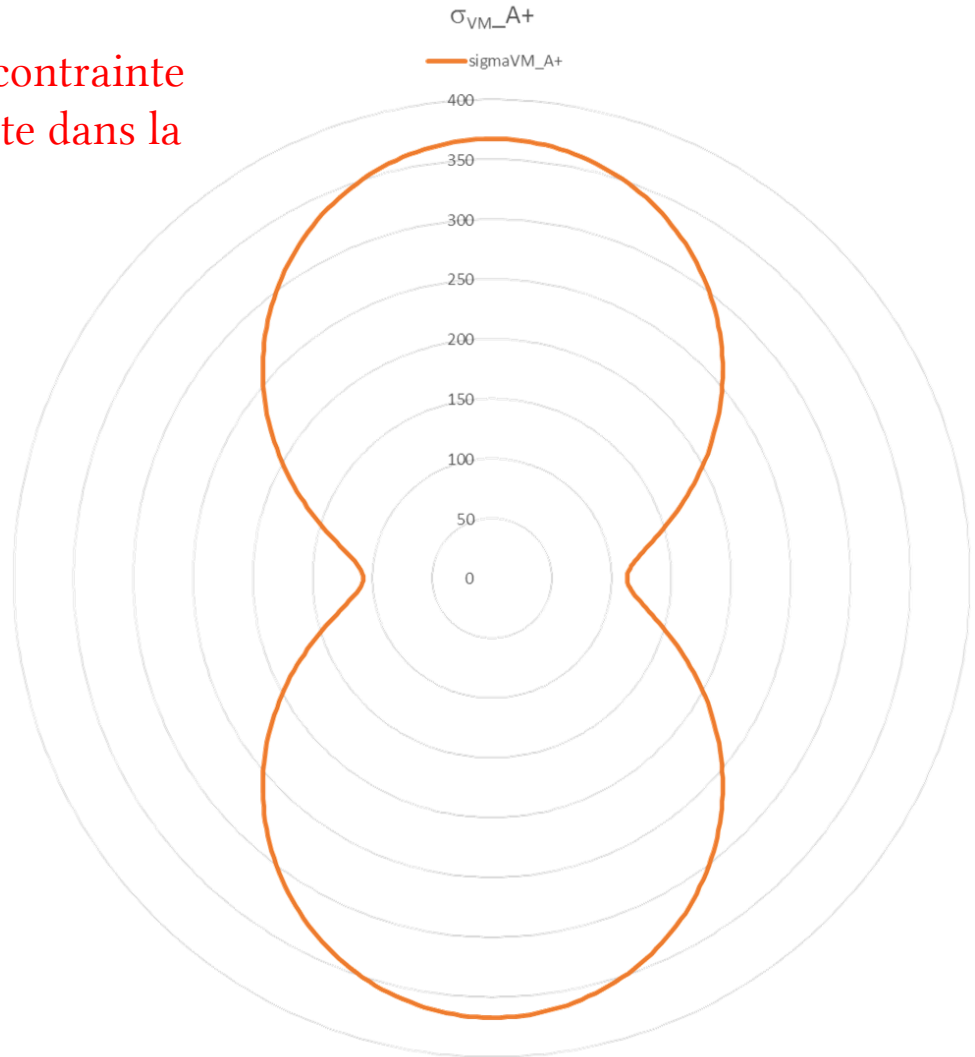
$$I_{11} = \frac{\pi d^4}{32} = 1,571 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 = 1,571 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \frac{N}{S} + \frac{M_2}{I_{22}} x_3 - \frac{M_3}{I_{33}} x_2 = \frac{275}{7,854 \cdot 10^{-9}} x_2 \\ \sigma_{12} &= \frac{T_2}{S} - \frac{M_1}{I_{11}} x_3 = \frac{-500}{3,14 \cdot 10^{-4}} + \frac{100}{1,571 \cdot 10^{-8}} x_3 \\ \sigma_{13} &= \frac{T_3}{S} + \frac{M_1}{I_{11}} x_2 = \frac{-100}{1,571 \cdot 10^{-8}} x_2 \end{aligned}$$

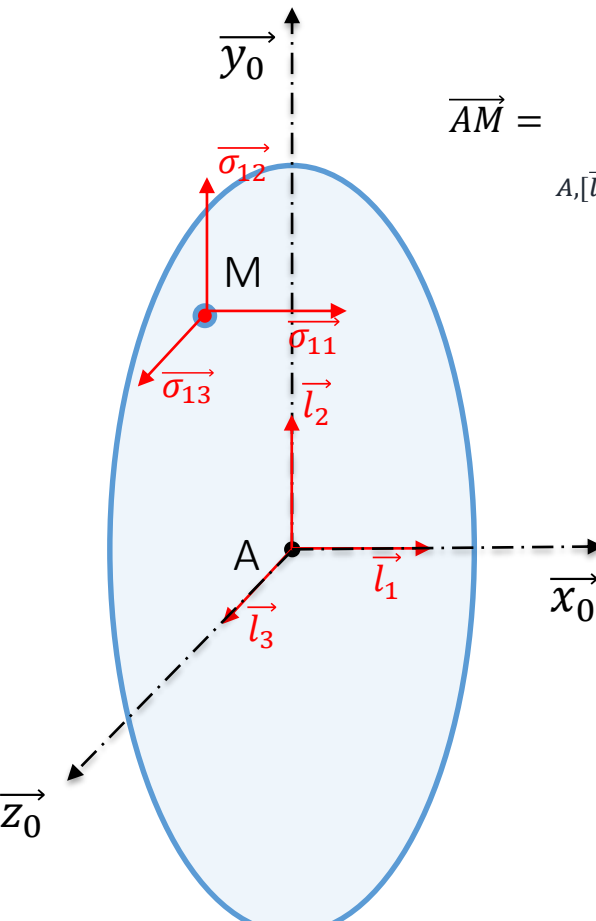
Contraintes dans la section critique A



Profil de contrainte équivalente dans la section A



Q5 à 7 : Contraintes dans la section critique A, contrainte équivalente



$\vec{AM} = \begin{matrix} 0 \\ d/2 \\ 0 \end{matrix}_{A, [\vec{l}_1, \vec{l}_2, \vec{l}_3]}$

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \frac{275}{7,854 \cdot 10^{-9}} 0,01 = 3,5 \cdot 10^8 Pa \\ \sigma_{12} &= \frac{-500}{3,14 \cdot 10^{-4}} = 1,59 \cdot 10^5 Pa \\ \sigma_{13} &= \frac{-100}{1,571 \cdot 10^{-8}} 0,01 = 6,36 \cdot 10^7 Pa \end{aligned}$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

$$\tau = \sqrt{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}$$

$$\sigma = \sigma_{11}$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_{11}^2 + 3(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2)} = 3,66 \cdot 10^8 Pa = 366 MPa$$

Q10 : Relation entre la fonction, le matériau, la géométrie et la performance

On constate que notre pièce travaille majoritairement en flexion, sa longueur L est donnée, sa section circulaire, on s'autorise à faire varier le diamètre d .

On cherche les matériaux permettant d'obtenir la manivelle d'énergie grise minimale. Pour compléter on étudiera aussi les critères de légèreté, de prix, et de contribution à l'effet de serre minimal.

Relation entre géométrie et contrainte de fonctionnement (être en dessous de la limite élastique).

$$\sigma_{VM} \approx \frac{M_3}{\frac{\pi d^4}{64}} \frac{d}{2} = \frac{32 \cdot M_3}{\pi d^3} < \sigma_e$$

Expression de la variable libre géométrique (d) en fonction de la contrainte de fonctionnement

$$d^3 > \frac{32 \cdot M_3}{\pi \sigma_e} \quad (1)$$

Q11 et 12 : Relation entre la fonction, le matériau, la géométrie et la performance

Relation entre géométrie et objectif de performance (la quantité d'énergie grise)

$$Q_J = S \cdot L \cdot \rho \cdot q_J \qquad Q_J = q_J \cdot \rho \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot L \quad (2)$$

Elimination de la variable libre dans la relation précédente (1) + (2)

$$Q_J > \frac{q_J \cdot \rho \cdot \pi}{4} \left(\frac{32 \cdot M_3}{\pi \sigma_e} \right)^{2/3} L$$

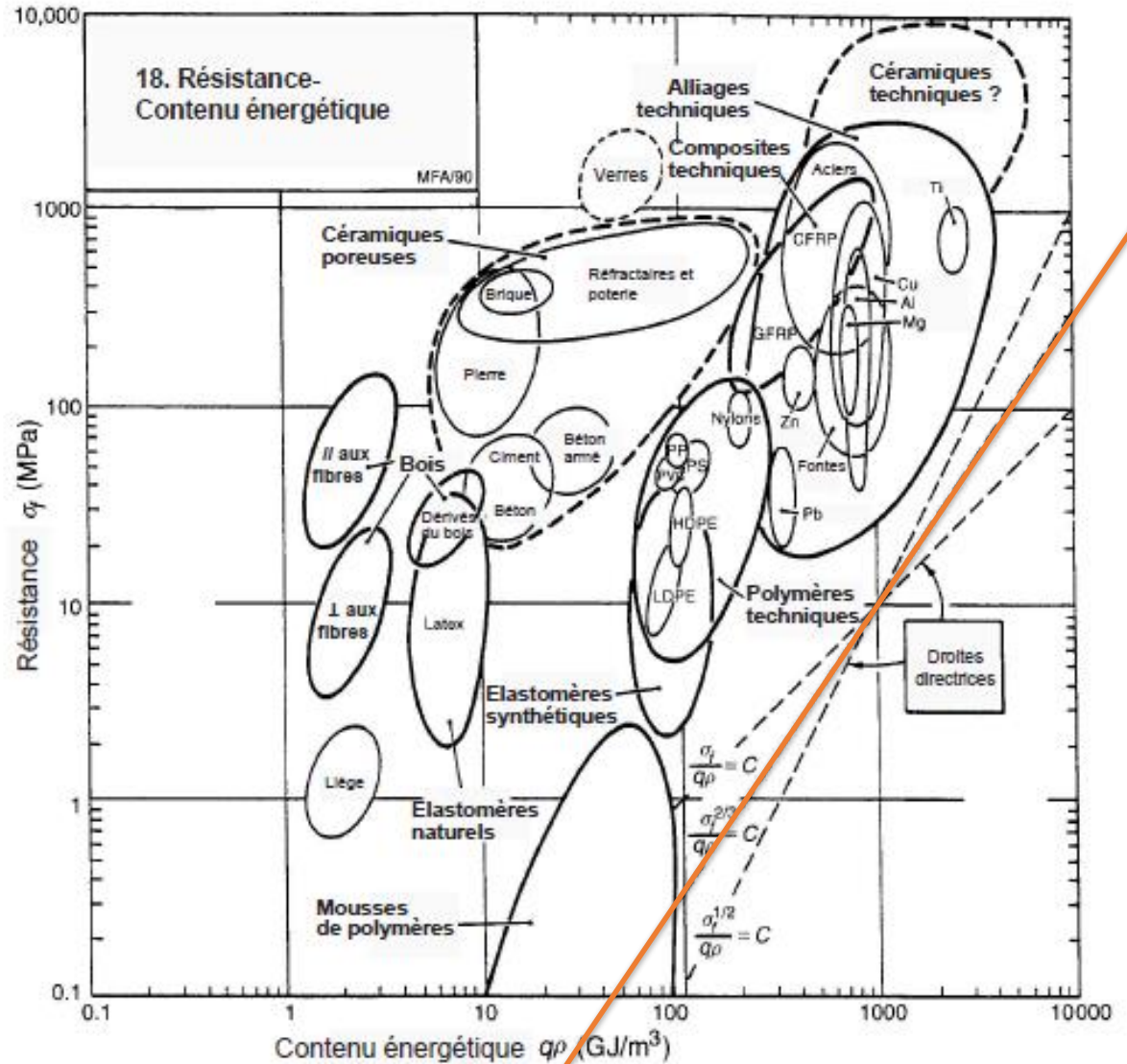
On isole le groupe de variables liées au matériau :

Le matériau permettant la manivelle d'énergie grise Q_J la plus faible est donc celui qui **maximise le rapport** $(\sigma_e^{2/3} / \rho \cdot q_J)$: c'est l'indice de la performance souhaitée. De la même façon on trouve que pour la moins chère il faut maximiser $(\sigma_e^{2/3} / C_m \rho)$, pour le CO₂ $(\sigma_e^{2/3} / Q_{CO_2} \cdot \rho)$ et pour la masse $(\sigma_e^{2/3} / \rho)$

Q13 : Recherche graphique pour le contenu énergétique

Dans un graphique $[\log(\sigma_e) ; \log(\rho \cdot q_J)]$ le rapport $(\sigma_e^{2/3} / \rho \cdot q_J)$ se traduit par une droite de pente 3/2 dont la position donne la valeur de la performance

Les matériaux situés sur la même droite donne la même performance : ici deux pièces de même contenu énergétique

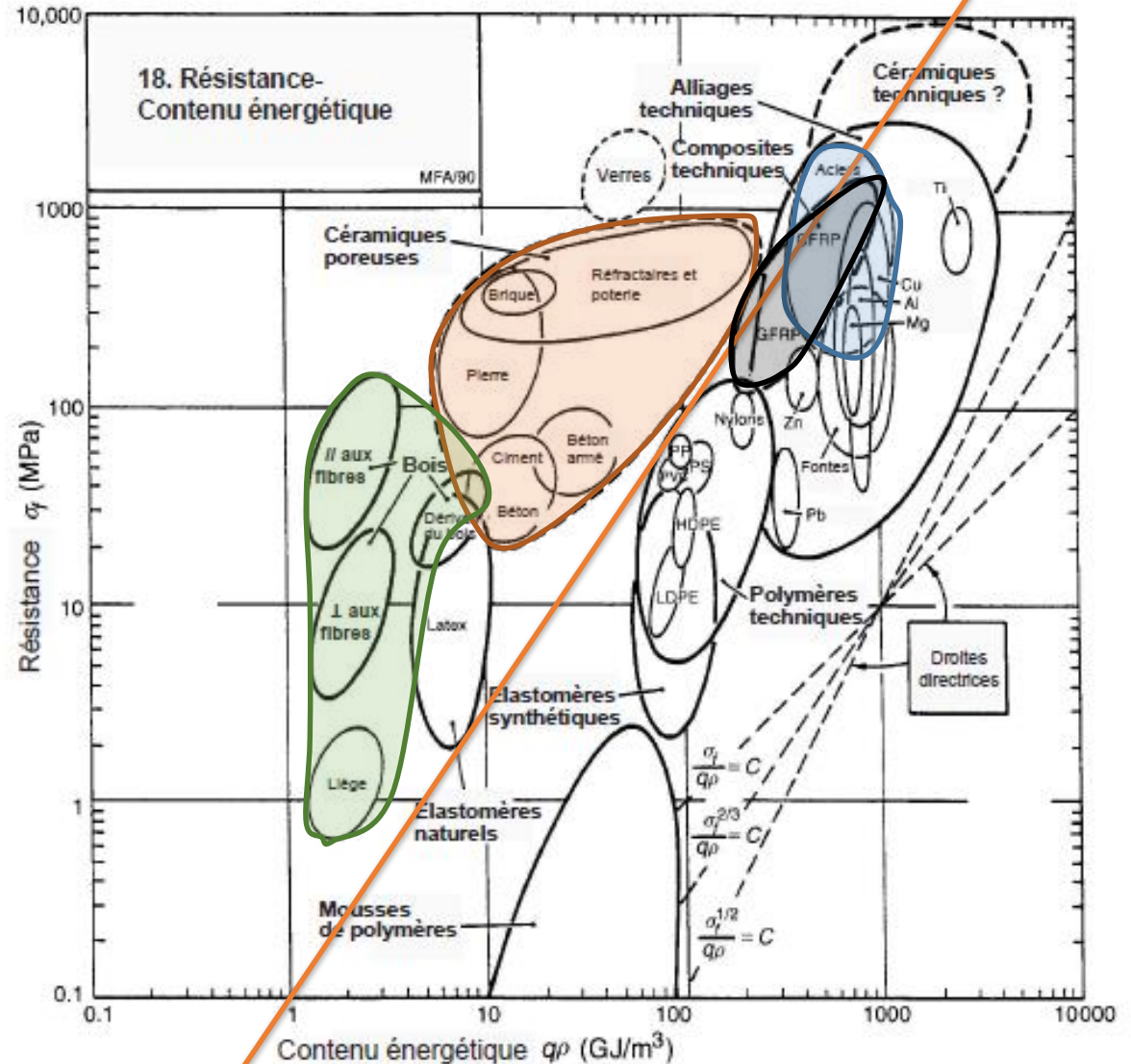


Q14 : Recherche graphique pour le contenu énergétique

On constate que les meilleurs matériaux sont :

- Brique, pierre
- Bois parallèle aux fibres
- Acier
- Fibre de carbone

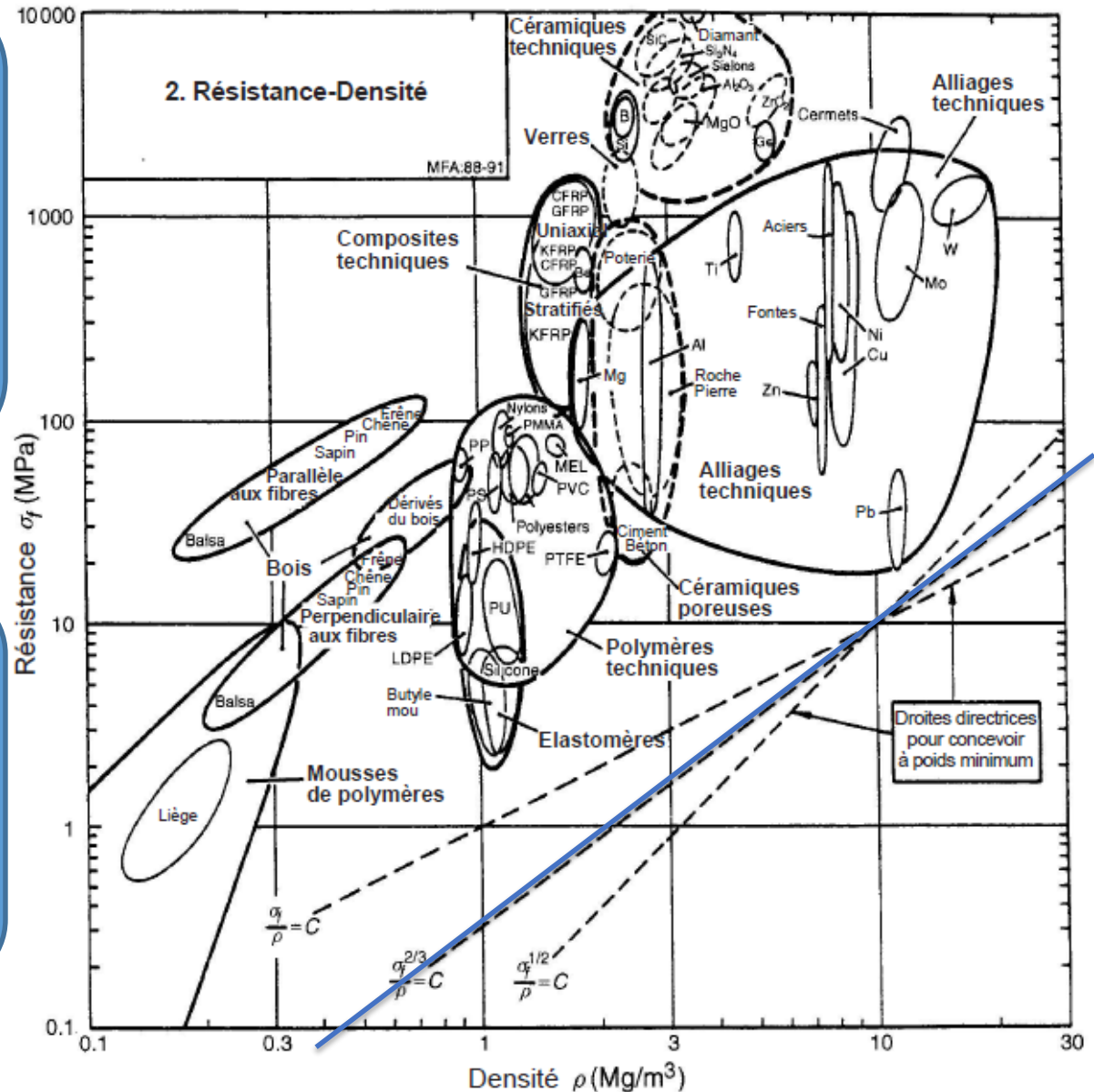
Une manivelle en brique ??



Q15 : Recherche graphique pour la masse

Dans un graphique $[\log(\sigma_e) ; \log(\rho)]$ le rapport $(\sigma_e^{2/3} / \rho)$ se traduit par une droite de pente 3/2 dont la position donne la valeur de la performance

Les matériaux situés sur la même droite donne la même performance : ici deux pièces de même masse

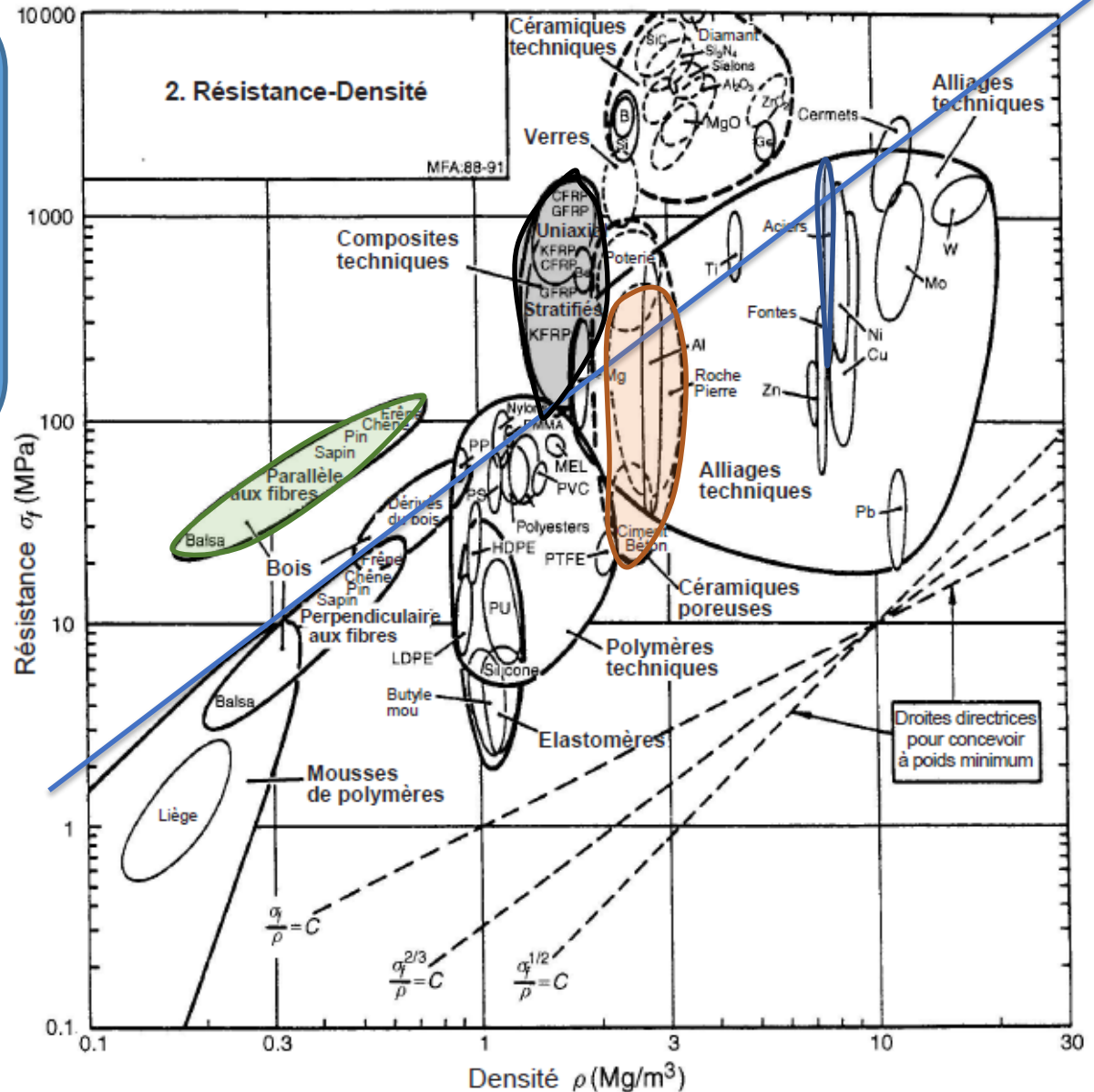


Q15 : Recherche graphique pour la masse

Les matériaux performants sont alors :

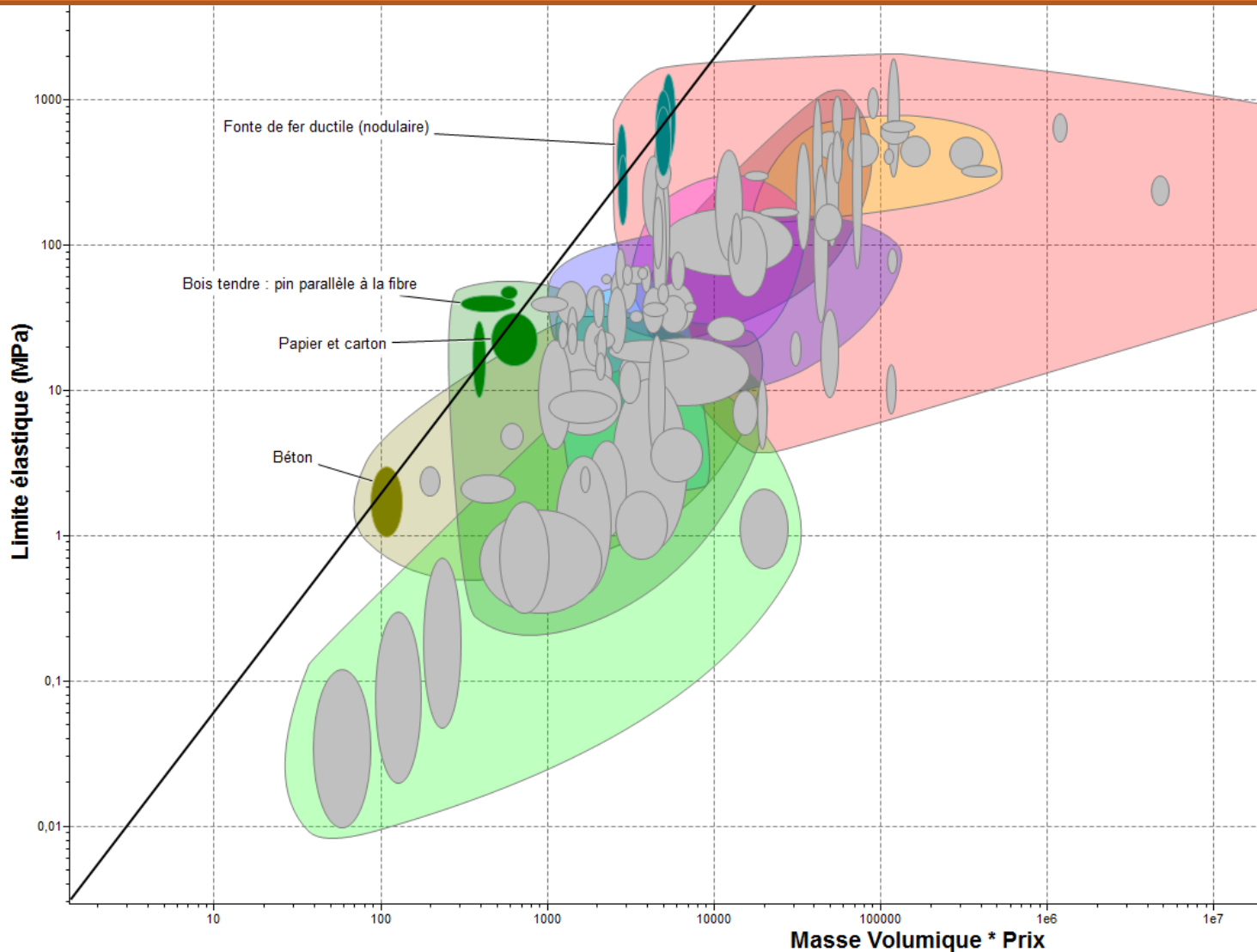
- Fibre de carbone
- Bois parallèle à la fibre
- Acier
- Pierre

Il faut définir un compromis entre les objectif



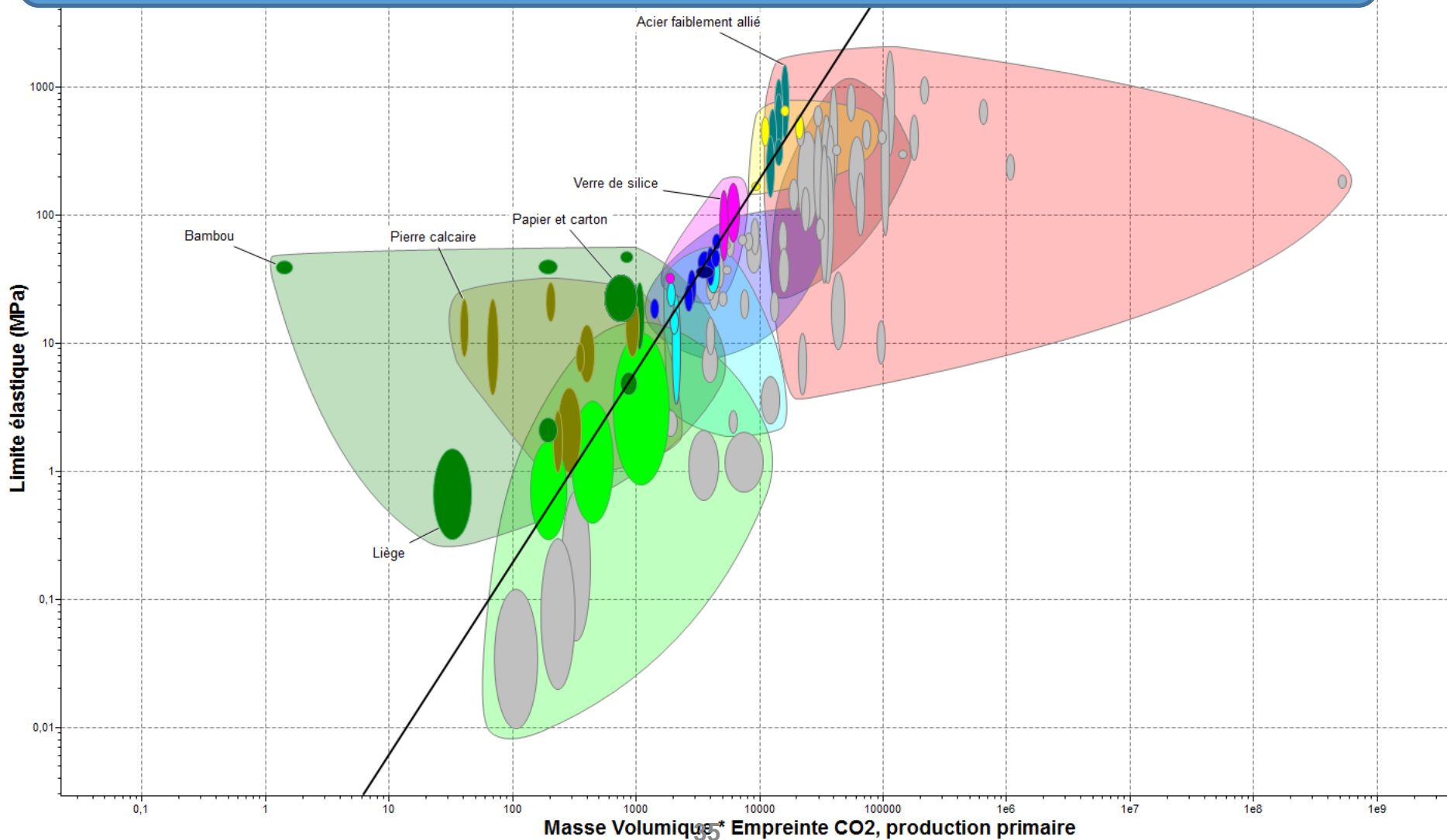
Recherche avec CES Edupack 2018 pour la performance de coût

TOUS les matériaux situés sur cette droite respectent la fonction et sont aussi économique que l'acier



Recherche avec CES Edupack 2018 pour la performance de CO₂

TOUS les matériaux situés sur cette droite respectent la fonction et sont aussi impactant en CO₂ que l'acier



Q16 à 18 : Synthèse : choix du matériau

Nom	indice de performance			
	masse	coût	CO2	énergie
Bois tendre : pin parallèle à la fibre	0,0226	0,0267	0,0601	0,00246
Composites renforcés de fibres de carbone (CFRP)	0,0538	0,00152	0,00155	0,000113
Acier inoxydable	0,00706	0,00135	0,00142	0,0000836

Remarque 1 : les ratios de performances en masse et coût n'ont rien à voir avec ceux en CO₂ et énergie : la manivelle en composite n'est que 2,38 fois plus légère que le pin pour 38,7 fois plus de CO₂ et 21,7 fois plus d'énergie...

Remarque 2 : cette sélection ne prend pas en compte les optimisation possible en forme (tube creux impossible pour le pin) et les possibilités de mise en œuvre (mode de fabrication à base de bois ? Composite ?). D'autres aspects (dureté, durée de vie, résistance chimique) sont également à considérer. A ce niveau la sélection ne doit donc pas être trop drastique...

Synthèse : proposition de reconception

	Masse (kg)	Coût (Euros)	CO ₂ (kg)	Energie (MJ)
tronçon AB en acier Ø20 mm	0,986	0,623	1,785	26,092
tronçon BD en pin Ø32 mm	0,209	0,187	0,090	1,547
tronçon BD en acier Ø20 mm	1,233	0,778	2,232	32,615
total tout acier Ø20 mm	2,220	1,401	4,017	58,707
total acier Ø20mm + pin Ø32 mm	1,196	0,810	1,875	27,639
gain	46%	42%	53%	53%

Synthèse : reconception



Masse : -46 %
Prix : -42 %
CO2 : -53 %
Énergie : -53%

