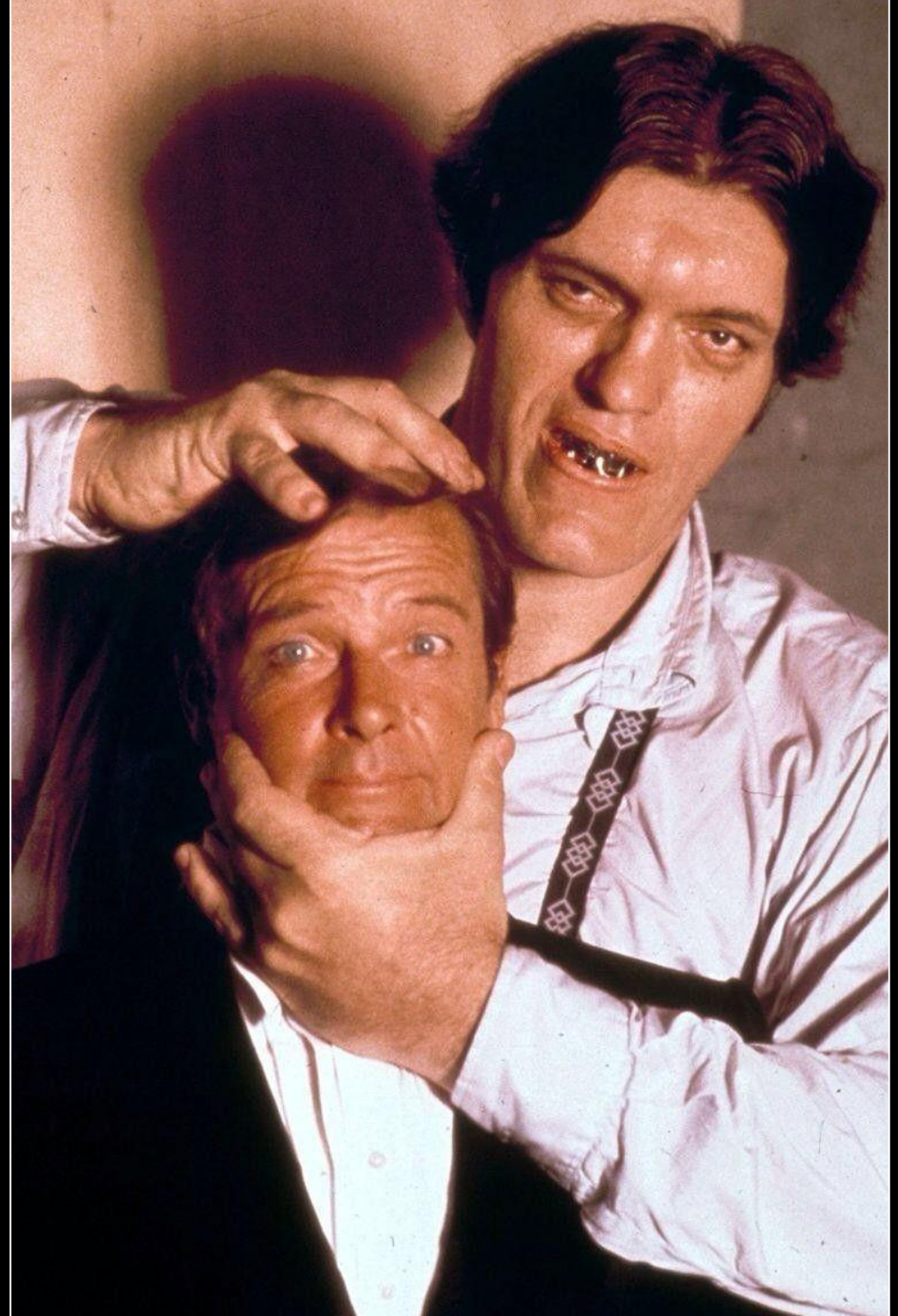


Physique pour Tous !

Saison 4
2021-2022

Cycle « Physique & Cinéma, édition spéciale 007 »

Quand les méchants de James Bond font leur démonstration de FORCE …

Mardi 28/09/2021, de 18h15 à 19h45, amphi Fresnel

Introduction

- Que serait un film de James Bond sans bons méchants ?
- Recette pour une aventure de James Bond : 3 types d'adversaires

Le cerveau,
le génie du mal

Le bras
droit

Les hommes
de main
(anonymes)

Se caractérise :
- par sa force naturelle
- par une particularité physique
- par une prothèse bionique

Force herculéenne
→ À étudier dans le cadre de la théorie de la « résistance des matériaux »
= statique + déformation des matériaux

Au programme ce soir

1. La statique du solide
2. Notion de résistance des matériaux
3. Exemple de traction
4. Exemple de compression
5. Exemple de cisaillement
6. Exemple d'une flexion

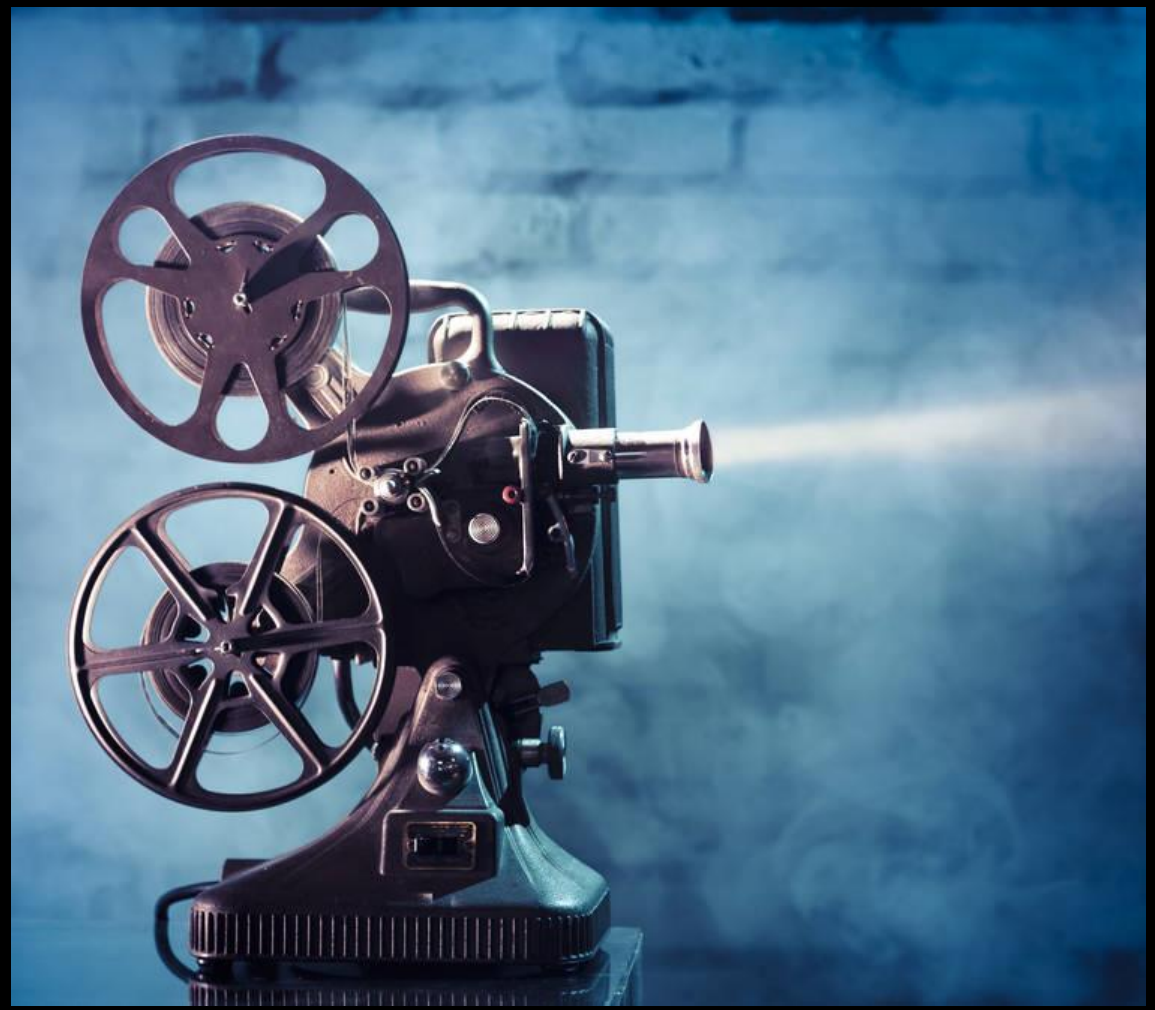
Disclaimer

Toutes les cascades montrées dans les extraits de films ont été réalisées par des professionnels ou sont le fruit de la magie du cinéma.

N’essayez surtout pas de les reproduire chez vous !

1. La statique du solide

Statique du solide

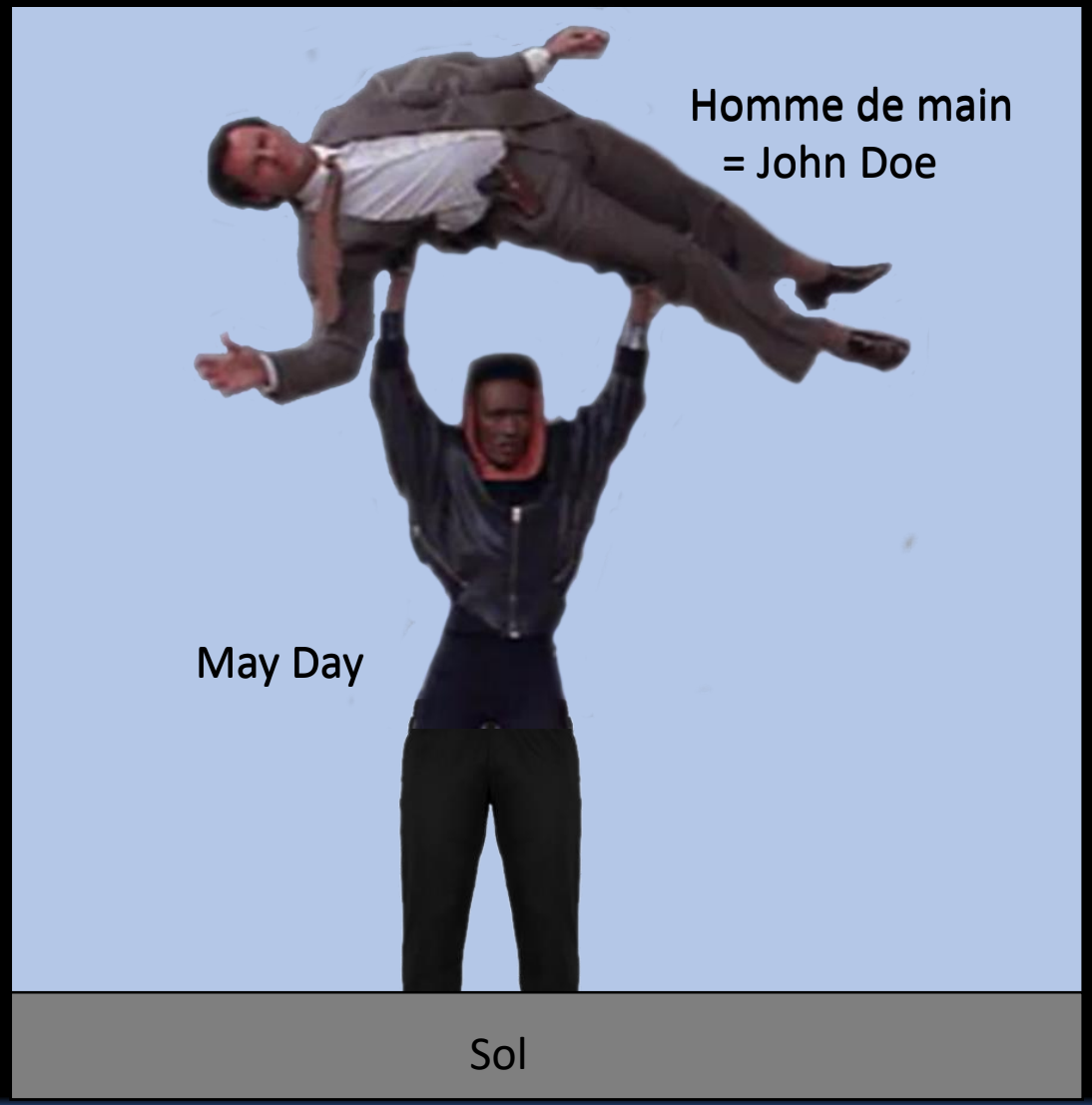


Extrait de « *Dangereusement votre* » , 1985, EON Productions

Une dispute éclate entre Max Zorin et les hommes du KGB.
May Day (interprétée par Grace Jones) va leur rappeler qui est le patron …

https://www.youtube.com/watch?v=VvI6eIRaJAw

Statique du solide

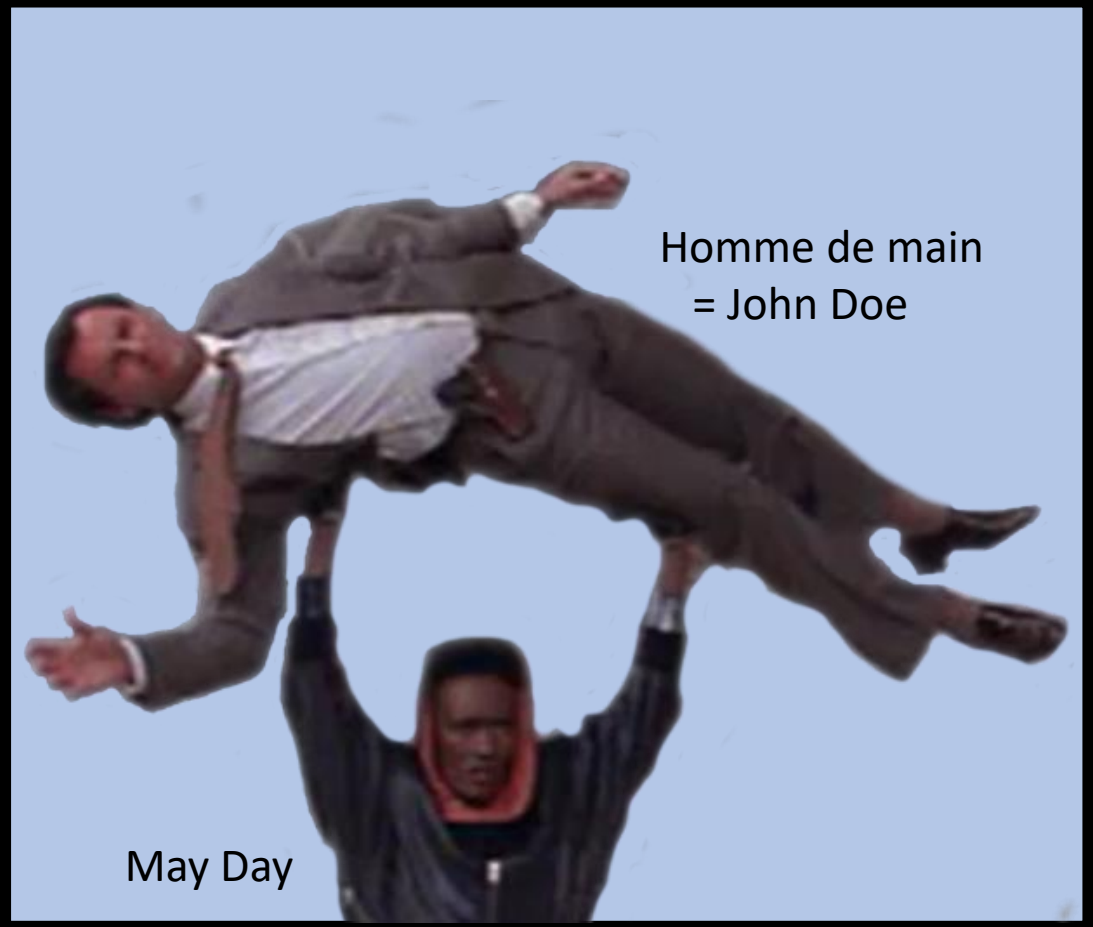


- Dans le langage courant, « statique » signifie immobile, sans mouvement.

Pour aller + loin :

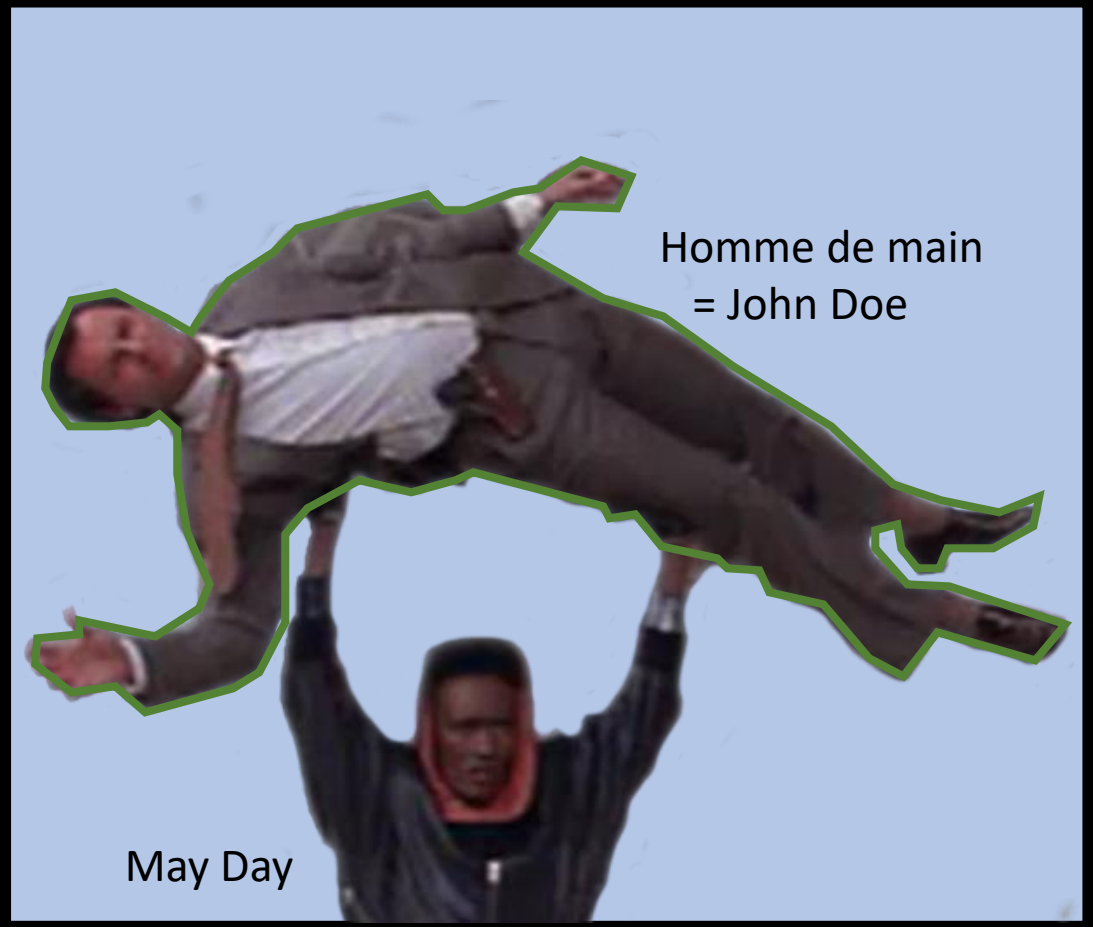
- En fait, la situation d'immobilité est une situation particulière qui peut être traitée par la statique.
- La statique du solide = étude des solides en équilibre.
- En supposant que la Terre est un référentiel galiléen, un système est en équilibre s'il est immobile ou en mouvement rectiligne uniforme par rapport à un repère lié à la Terre.

Statique du solide



Système étudié : John Doe

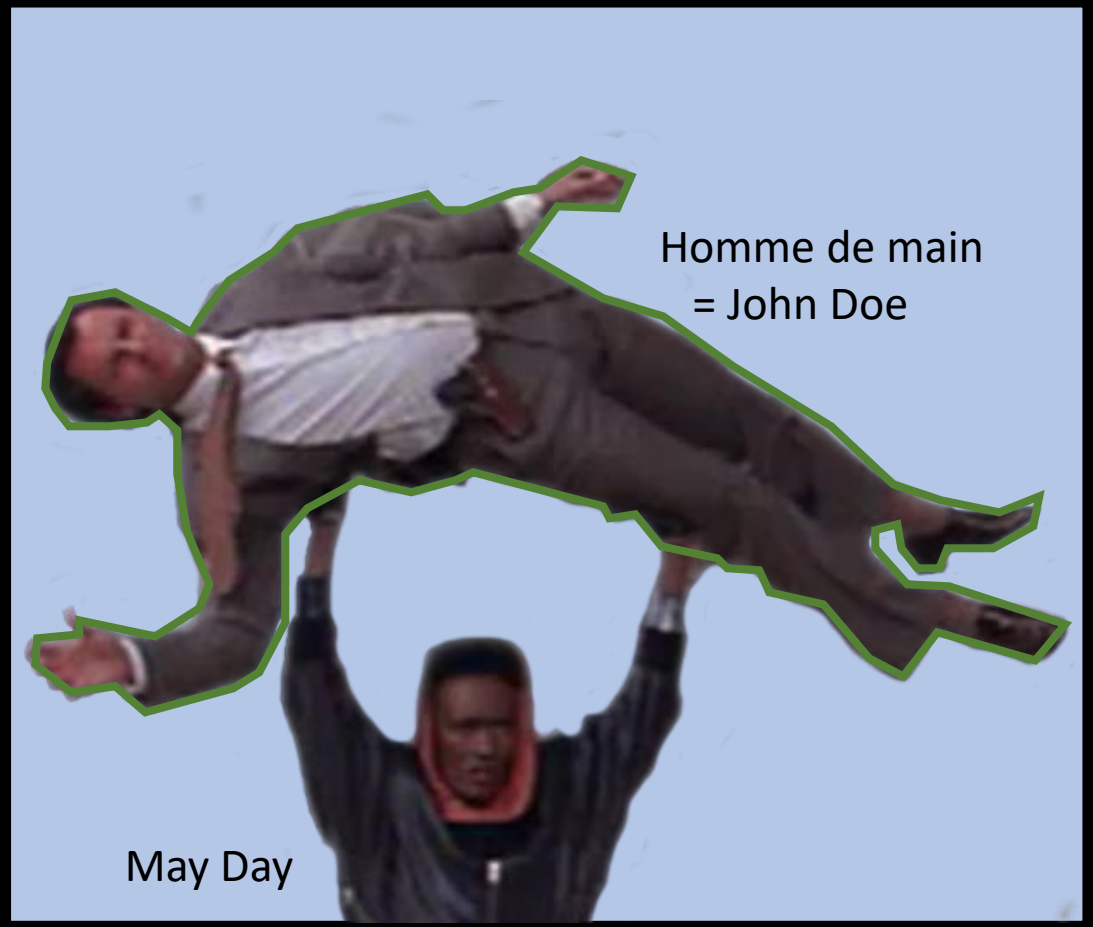
Statique du solide



Système étudié : John Doe

On représente la frontière d'isolement.

Statique du solide



Système étudié : John Doe

On représente la frontière d'isolement.

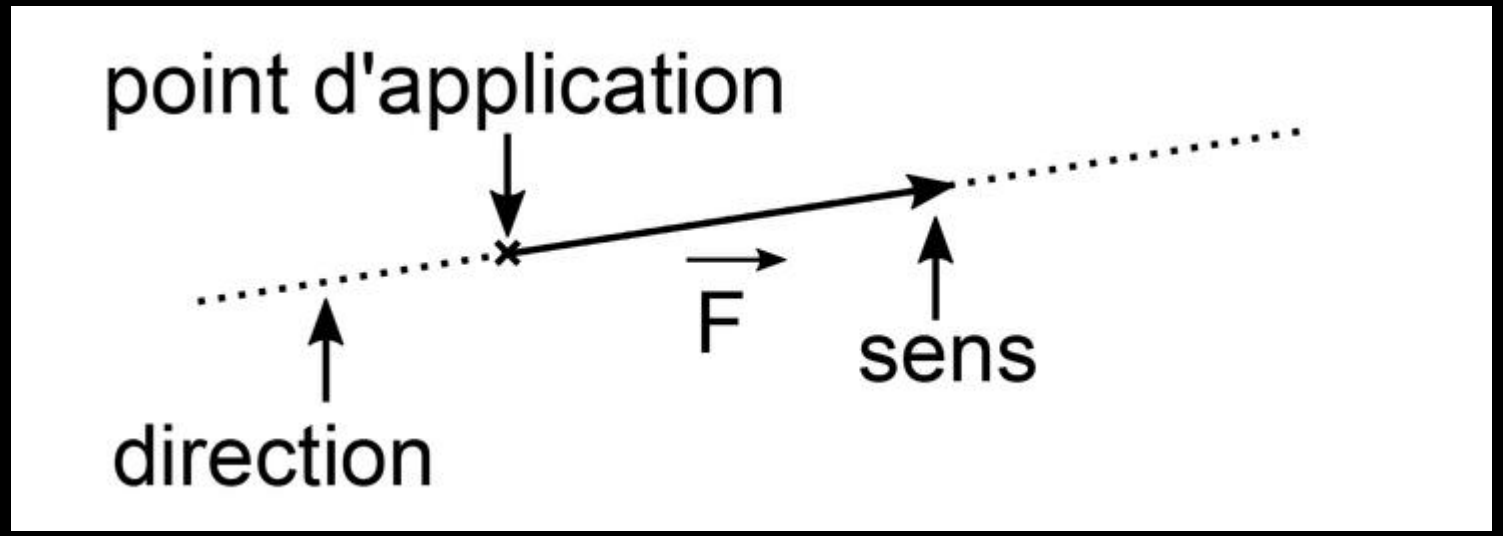
Bilan des actions mécaniques extérieures :

- Action de la main gauche de May Day sur John Doe
- Action de la main droite de May Day sur John Doe
- Action du poids de John Doe

Statique du solide

Comment représenter une action mécanique ?

1ère partie : la notion de force



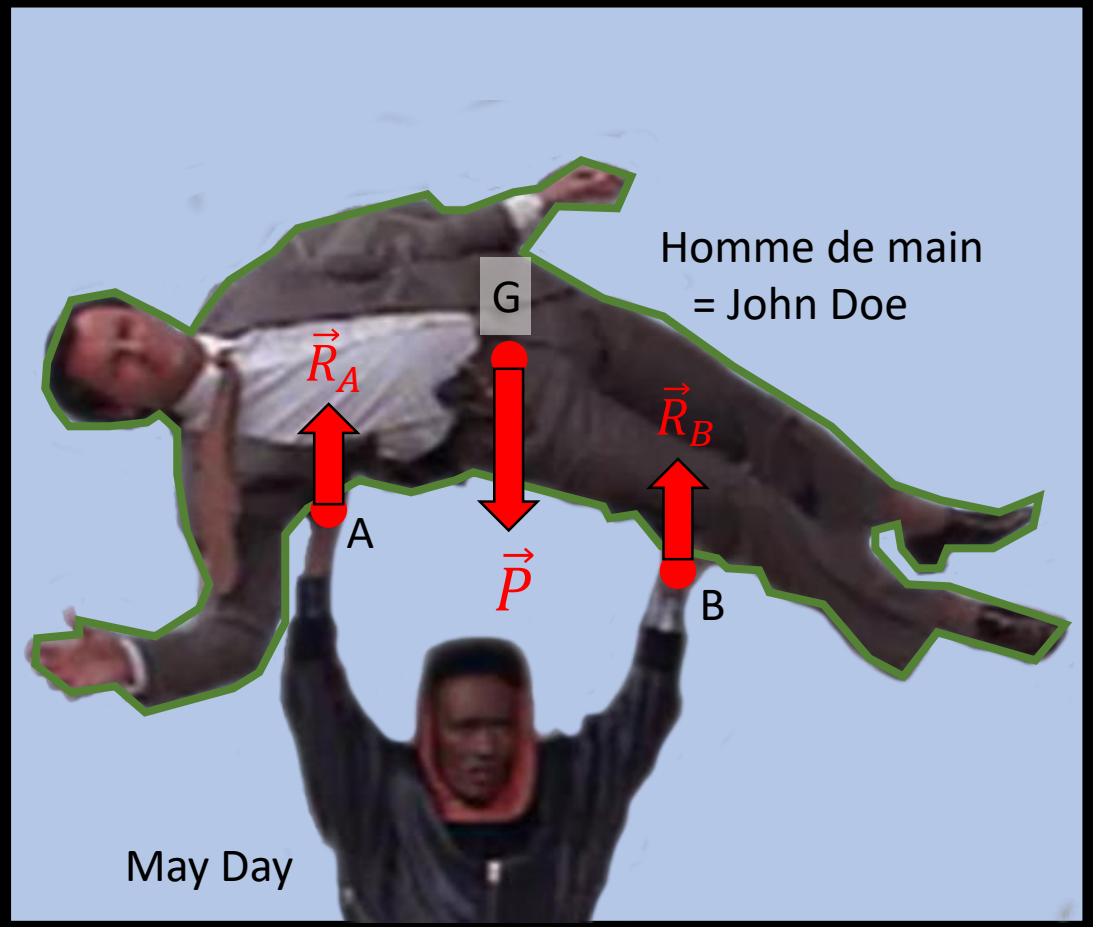
Une force se caractérise par :
- Une direction
- Un sens
- Une intensité
- Un point d'application

Mathématiquement, une force
= vecteur lié
= vecteur + point d'application

Unité de la force : le newton (N)

La force est responsable des mouvements de translation.

Statique du solide



Bilan des actions mécaniques extérieures :

- Action de la main gauche de May Day sur John Doe
  → force $\vec{R}_B$ appliquée au point B (centre de la main)

- Action de la main droite de May Day sur John Doe
  → force $\vec{R}_A$ appliquée au point A (centre de la main)

- Action du poids de John Doe
  → force $\vec{P}$ appliquée au centre de gravité
  Calculable facilement :

$$P = m \cdot g$$

Constante de gravité 9,81 m/s²

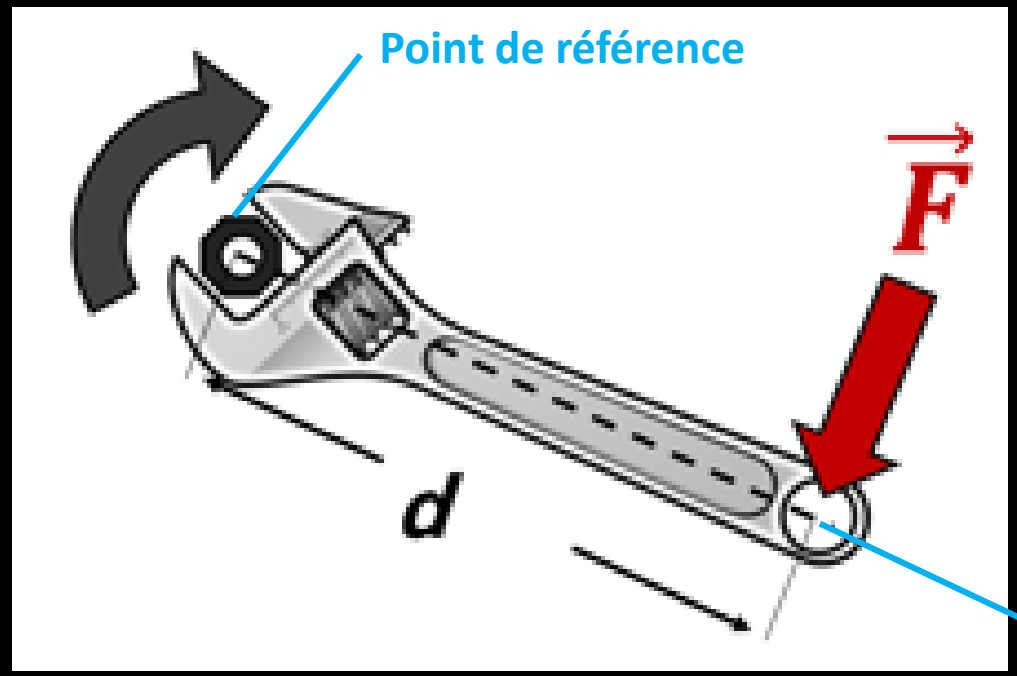
Masse de John $\sim 90\ kg$

$$P = m \cdot g = 883\ \text{N}$$

Statique du solide

Comment représenter une action mécanique ?

2ème partie : la notion de moment



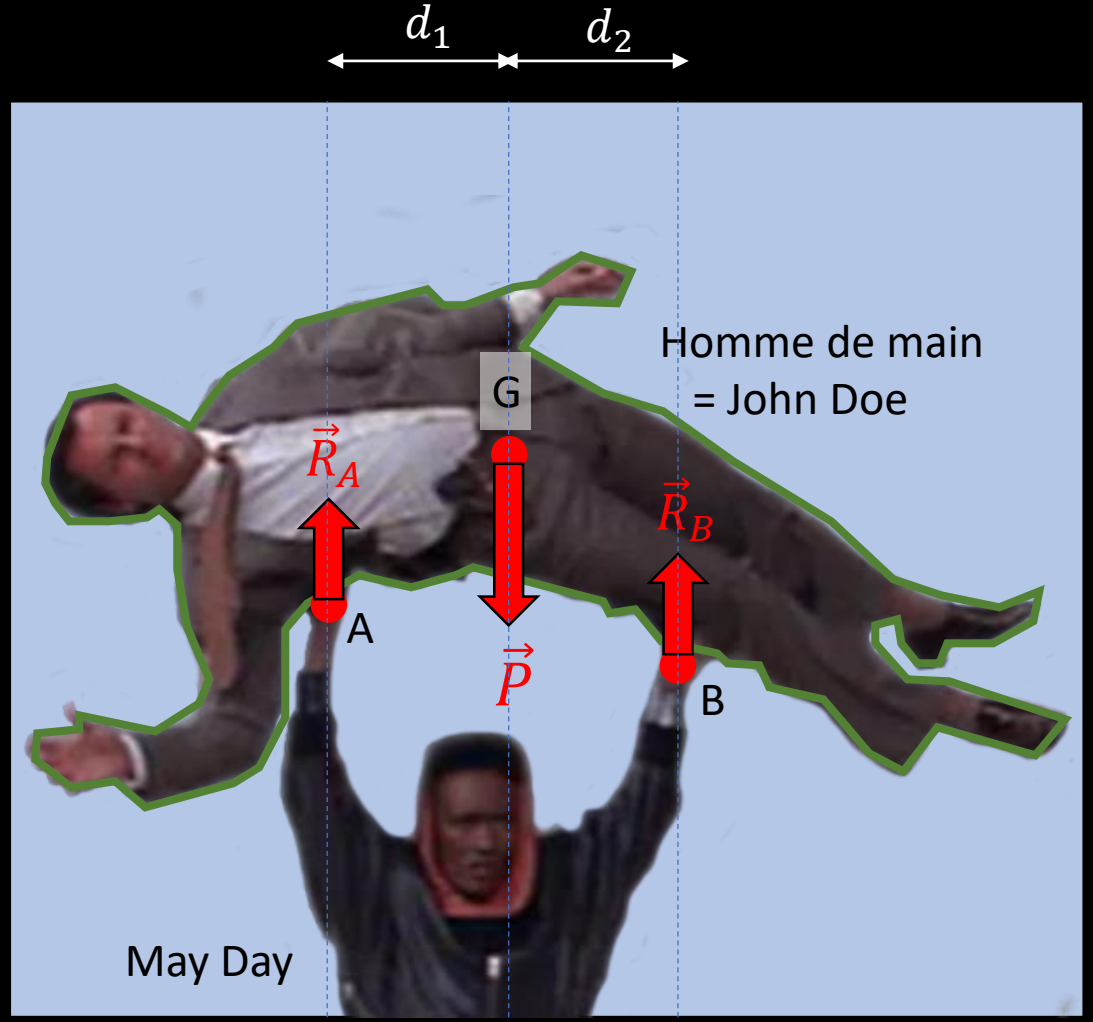
Un moment se caractérise par :
- Une force appliquée en un point
- Un point de référence
- Intensité :
  M = F × bras de levier

Mathématiquement, un moment
= vecteur lié
= vecteur + point de référence

Unité du moment : N.m

Le moment est responsable des mouvements de **rotation**.

Statique du solide



Prenons G comme point de référence pour écrire les moments.

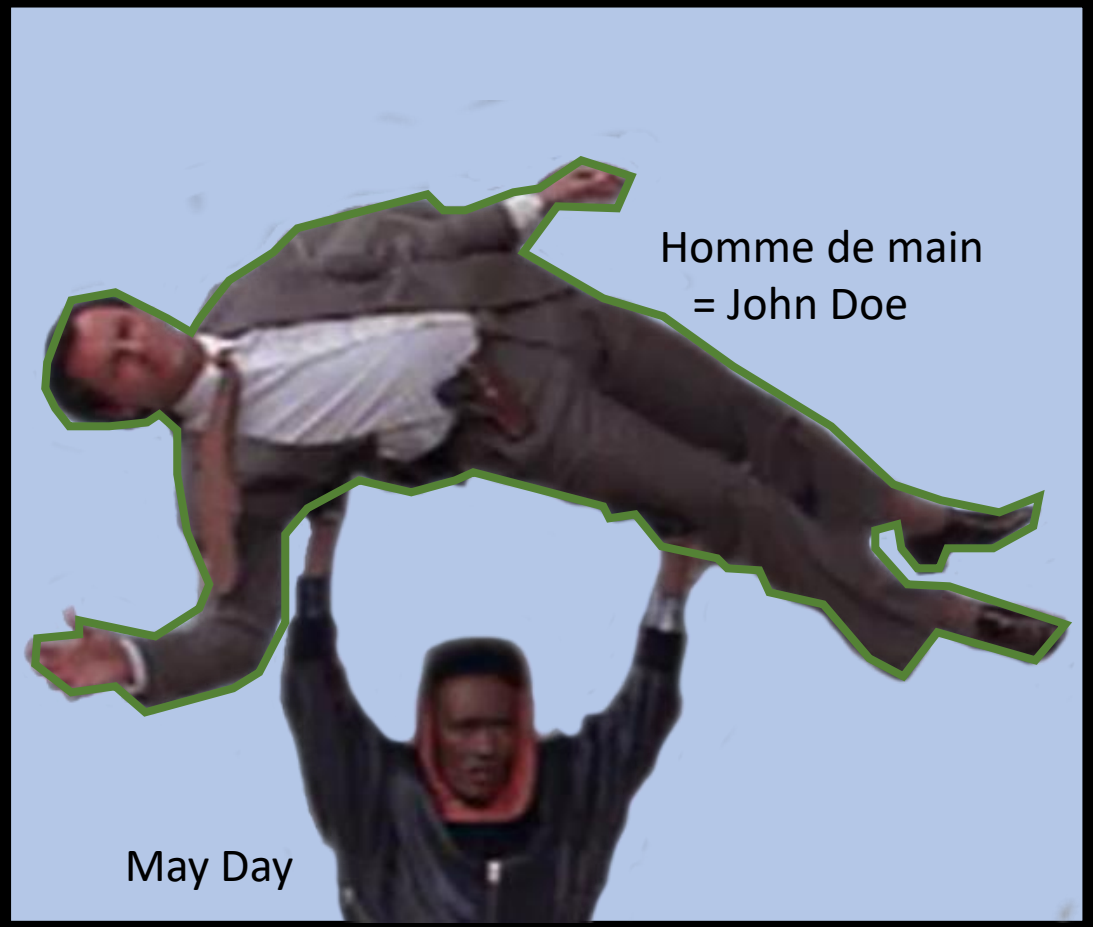
Bilan des actions mécaniques extérieures :

- Action de la main gauche de May Day sur John Doe
  → force $\vec{R}_B$ appliquée au point B (centre de la main)
  → moment de $\vec{R}_B$ en G : $M(\vec{R}_B)_G = R_B \cdot d_2$

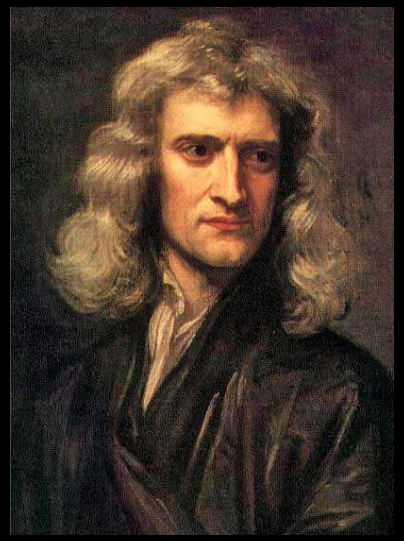
- Action de la main droite de May Day sur John Doe
  → force $\vec{R}_A$ appliquée au point A (centre de la main)
  → moment de $\vec{R}_A$ en G : $M(\vec{R}_A)_G = R_A \cdot d_1$

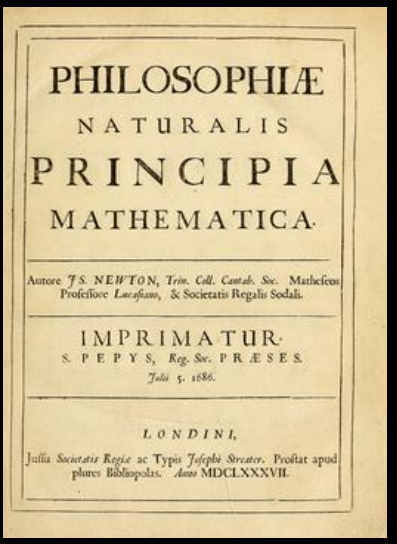
- Action du poids de John Doe
  → force $\vec{P}$ appliquée au centre de gravité
  → moment de $\vec{P}$ en G : $M(\vec{P})_G = 0$

Statique du solide



Newton
1687

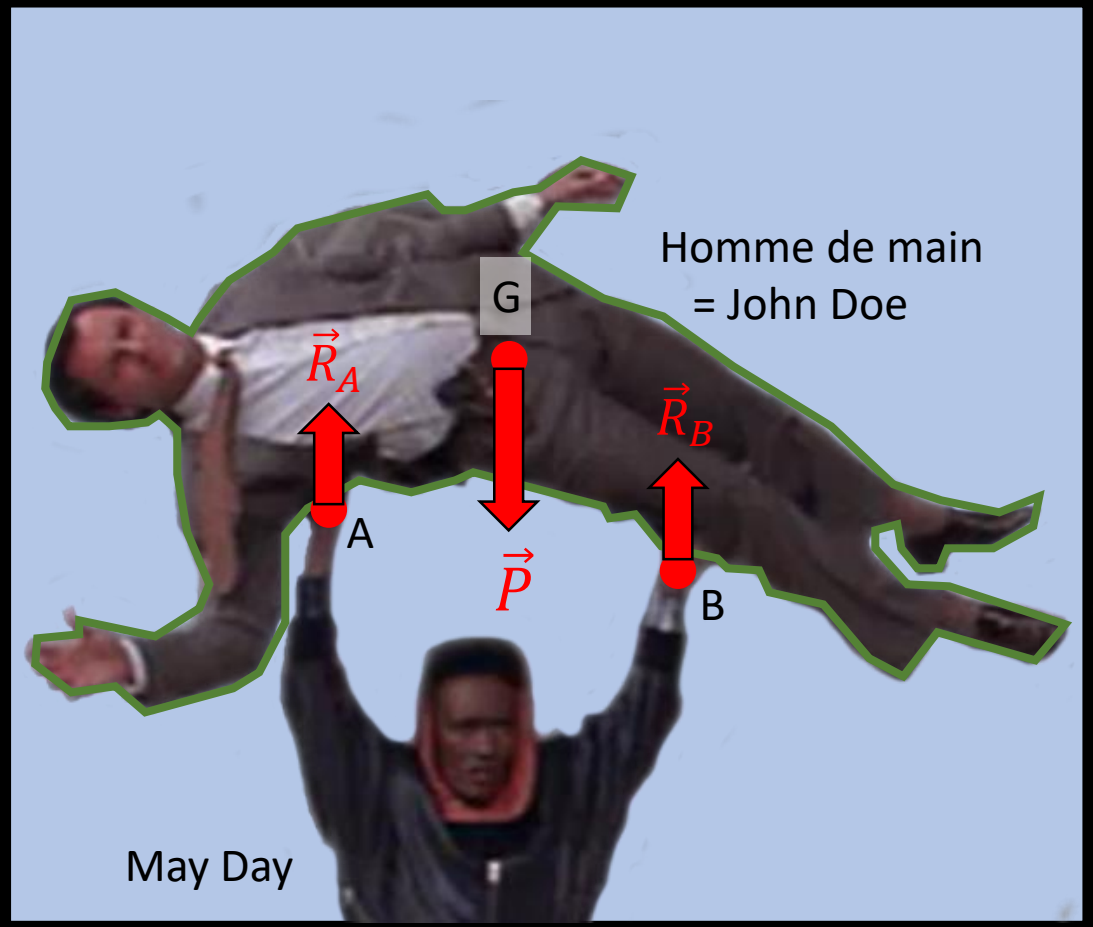



PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA
Autore *Is. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.*
IMPRIMATUR.
S. PEPYS, *Reg. Soc. PRÆSES.*
Julii 5. 1686.
LONDINI,
Juſſu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Proſtat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

Principe fondamental de la statique

- Théorème de la résultante statique → pour les forces
- Théorème du moment statique → pour les moments

Statique du solide



Théorème de la résultante statique

La somme des forces extérieures doit s'annuler.

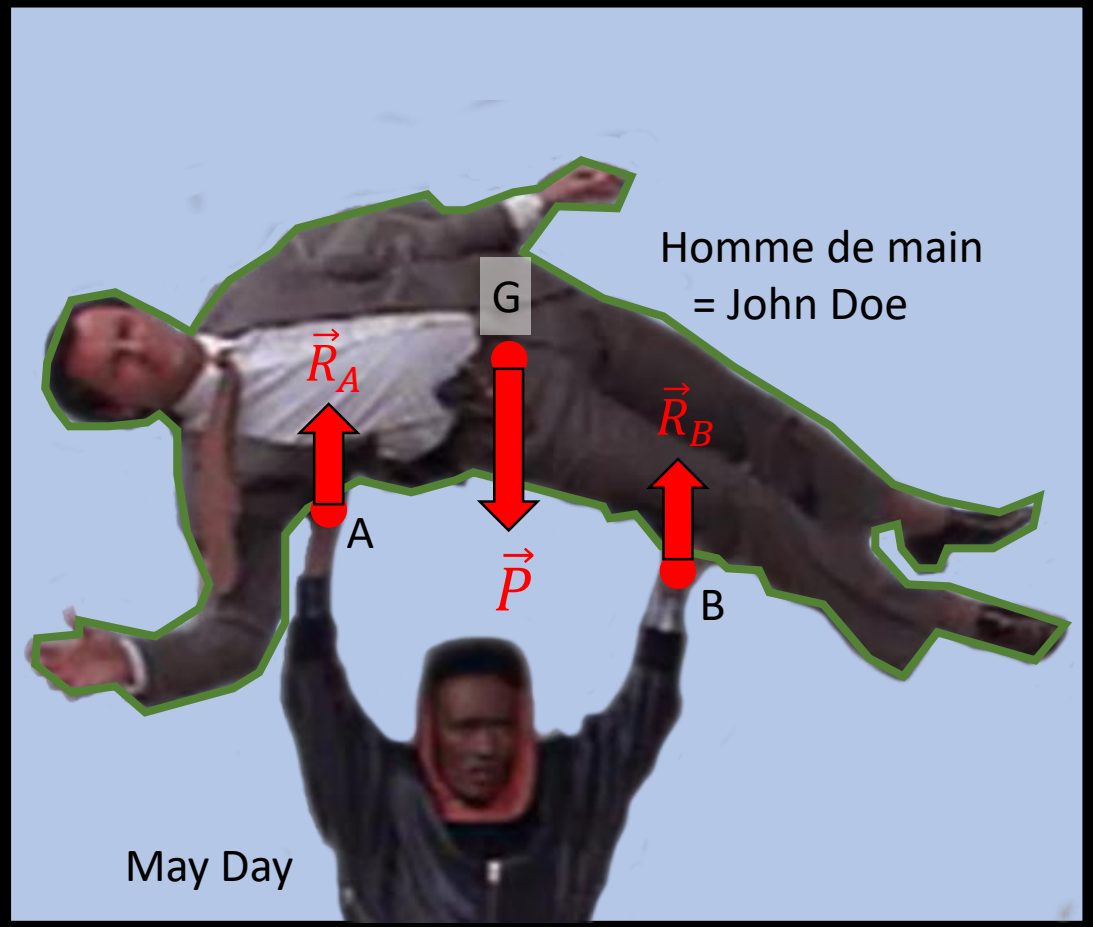
$$\sum \vec{F}_{ext} = \vec{0}$$

« Les mouvements de translation ne sont pas autorisés. »

$$\vec{R}_A + \vec{R}_B + \vec{P} = \vec{0}$$

$$R_A + R_B - P = 0$$

Statique du solide



Théorème du moment statique

La somme des moments des force doit s'annuler en tout point X du système étudié.

Pour tout point X $\sum \vec{M}_X(\vec{F}_{ext}) = \vec{0}$

« Les mouvements de rotation ne sont pas autorisés. »

Au point G, $\vec{M}(\vec{P})_G + \vec{M}(\vec{R}_A)_G + \vec{M}(\vec{R}_B)_G = \vec{0}$

$$0 + R_A \cdot d_1 - R_B \cdot d_2 = 0$$

Statique du solide

En résumé

On aboutit un système de 2 équations à 2 inconnues (système isostatique) :

$$\begin{cases} P = R_A + R_B \qquad (= 880\ N) \\ R_A \cdot d_1 = R_B \cdot d_2 \end{cases}$$

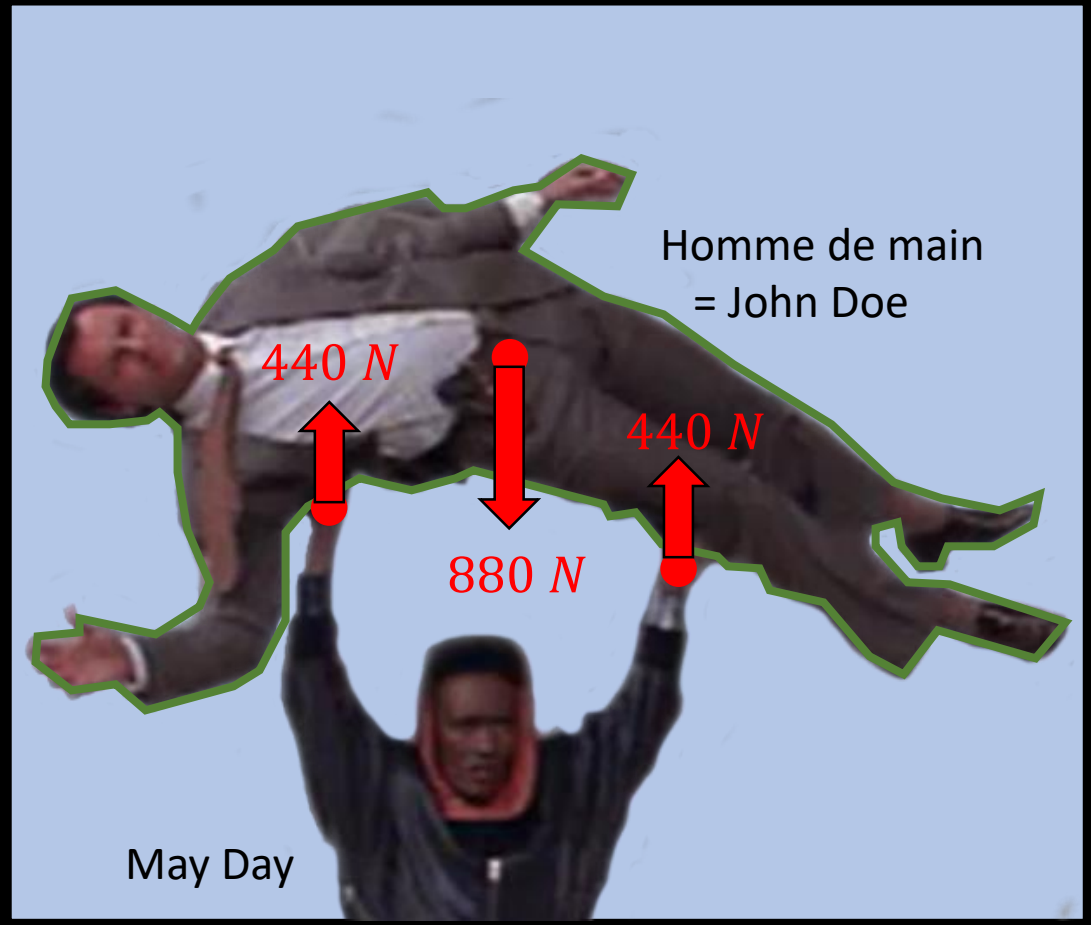
On fait l'hypothèse que les 2 bras de levier sont égaux :

$$d_1 = d_2$$

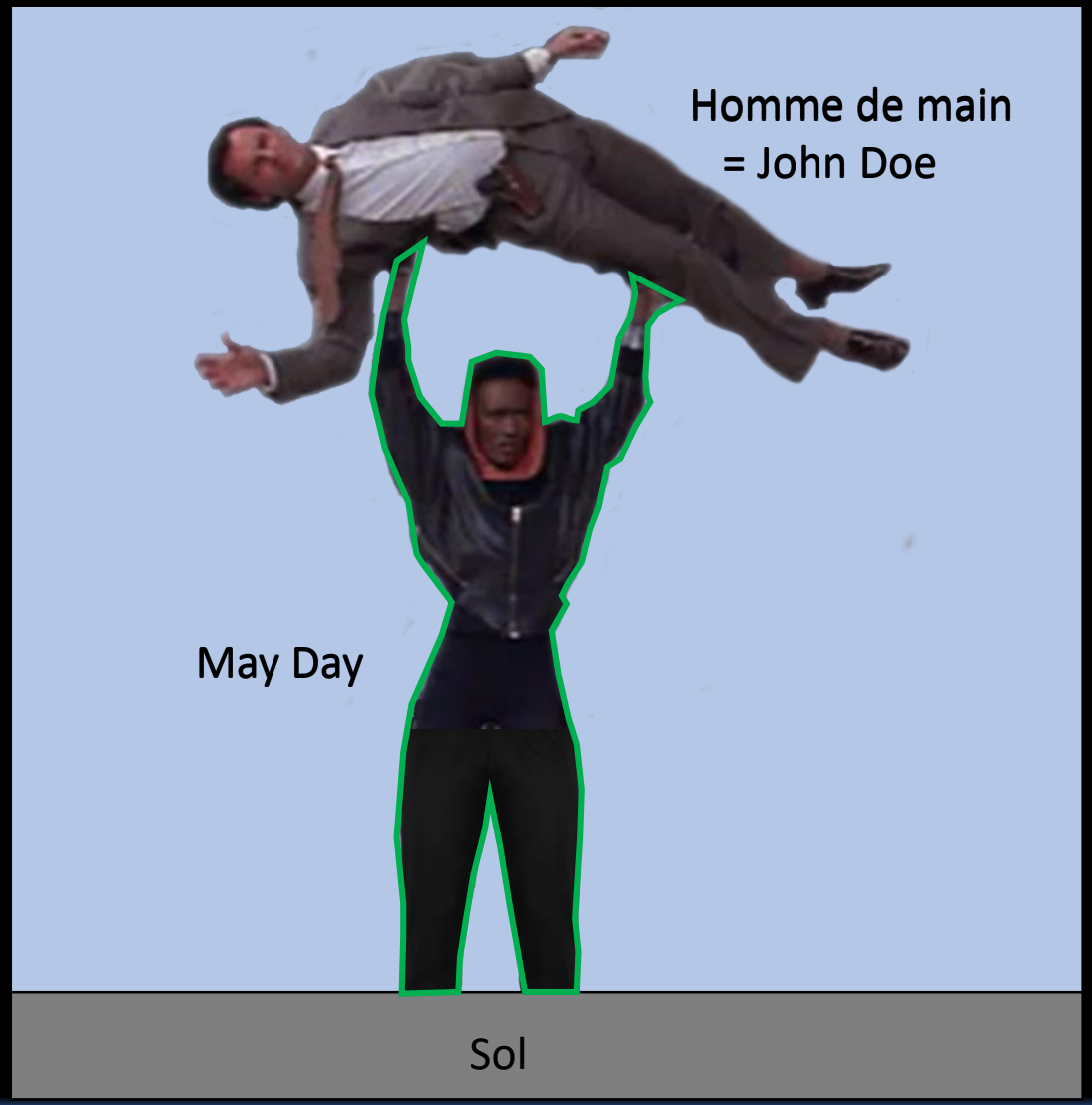
$$\begin{cases} P = R_A + R_B \qquad (= 880\ N) \\ R_A = R_B \end{cases}$$

On détermine les 2 inconnues :

$$R_A = R_B = \frac{\text{poids de John}}{2} = 440\ \text{N}$$



Statique du solide



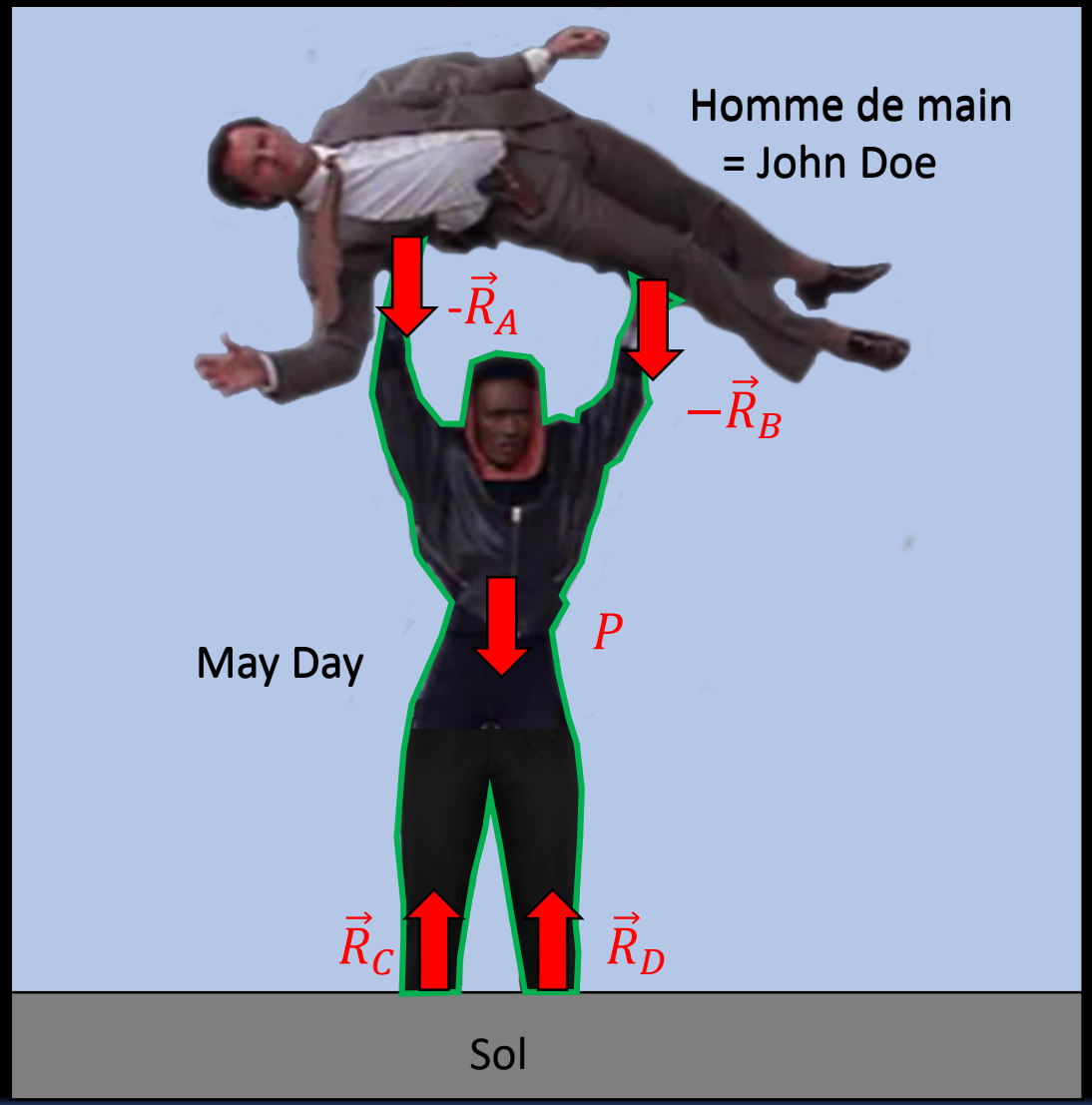
Système étudié : May Day

On représente la frontière d'isolement.

Bilan des actions mécaniques extérieures :

- Action de l'homme de main sur May Day à la main droite
- Action de l'homme de main sur May Day à la main gauche
- Action du sol sur May Day au niveau du pied droit
- Action du sol sur May Day au niveau du pied gauche
- Action de la gravité sur May Day : le poids

Statique du solide

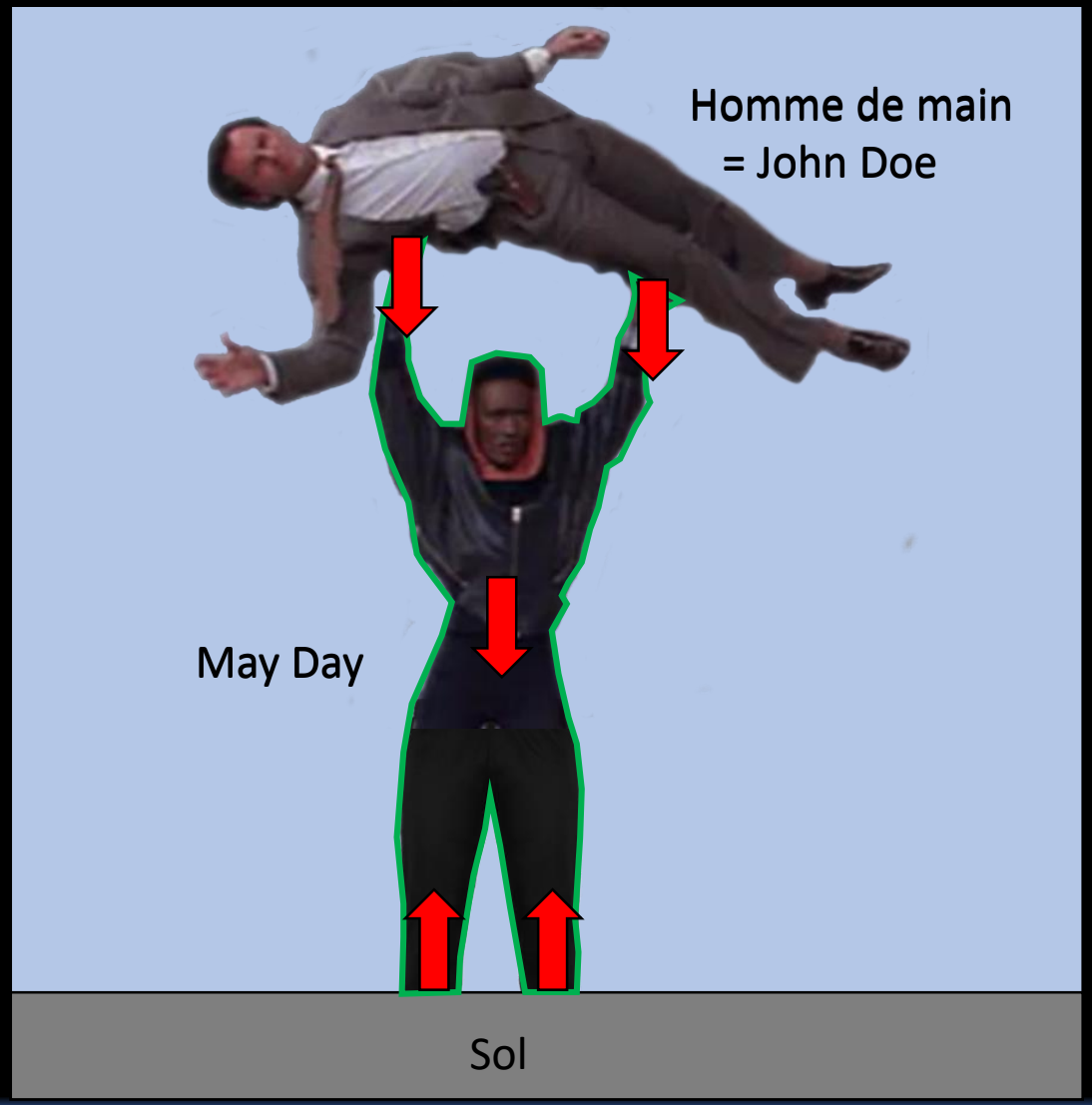


Application du théorème de la résultante statique :

Bilan des actions mécaniques extérieures :

- Action de l'homme de main sur May Day à la main droite
  → force $-\vec{R}_B$ dont la norme est de 440 N
- Action de l'homme de main sur May Day à la main gauche
  → force $-\vec{R}_A$ dont la norme est de 440 N
- Action du sol sur May Day au niveau du pied droit
  → réaction $\vec{R}_C$ dont la norme est inconnue
- Action du sol sur May Day au niveau du pied gauche
  → réaction $\vec{R}_D$ dont la norme est inconnue
- Action de la gravité sur May Day : le poids
  → $\vec{P} = m\vec{g}$ dont la norme est de 637 N

Statique du solide



Application du théorème de la résultante statique :

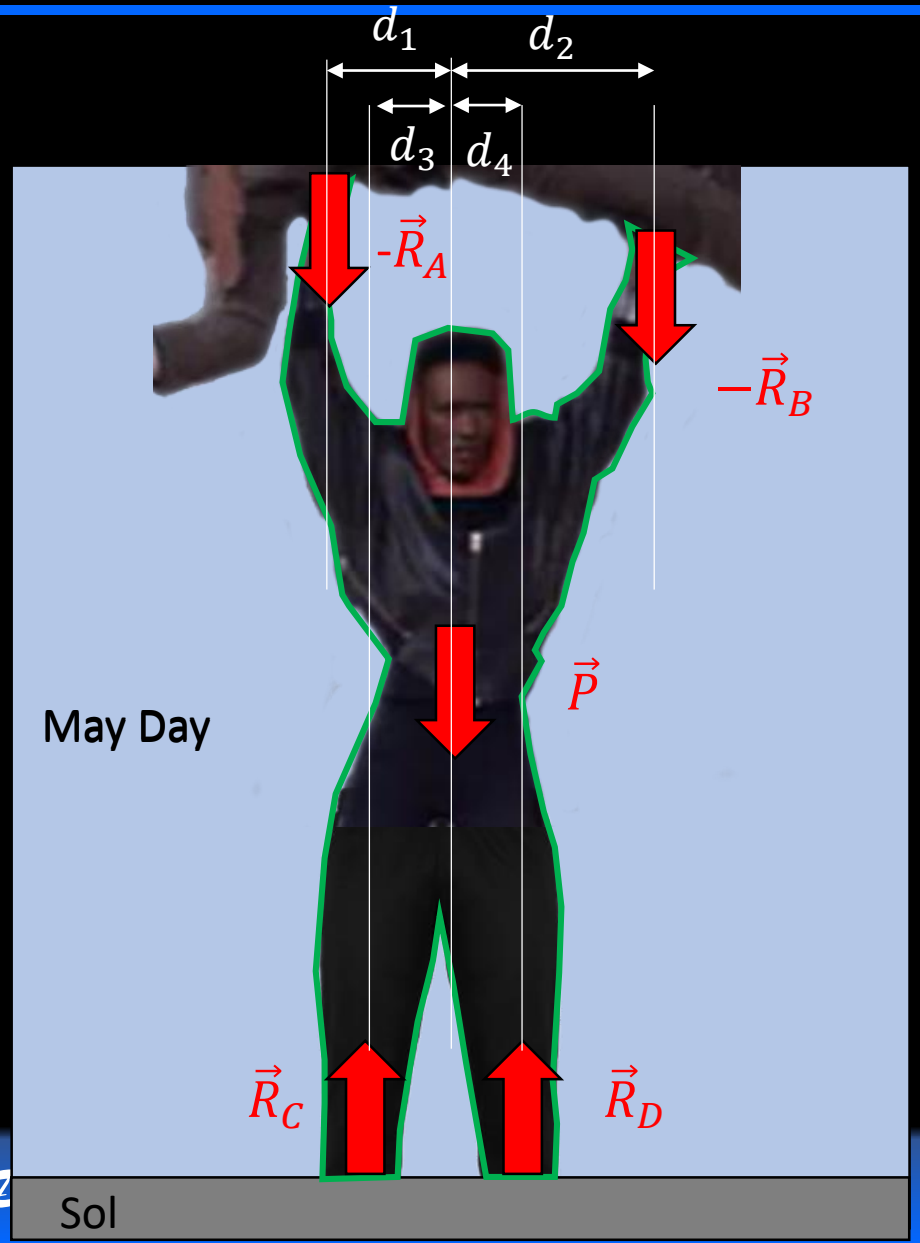
$$-\vec{R}_B - \vec{R}_A + \vec{P} + \vec{R}_C + \vec{R}_D = \vec{0}$$

$$-R_B - R_A - P + R_C + \mathrm{R_D} = 0$$

$$-440 - 440 - 637 + R_C + \mathrm{R_D} = 0$$

$$R_C + \mathrm{R_D} = 1\,517\ N$$

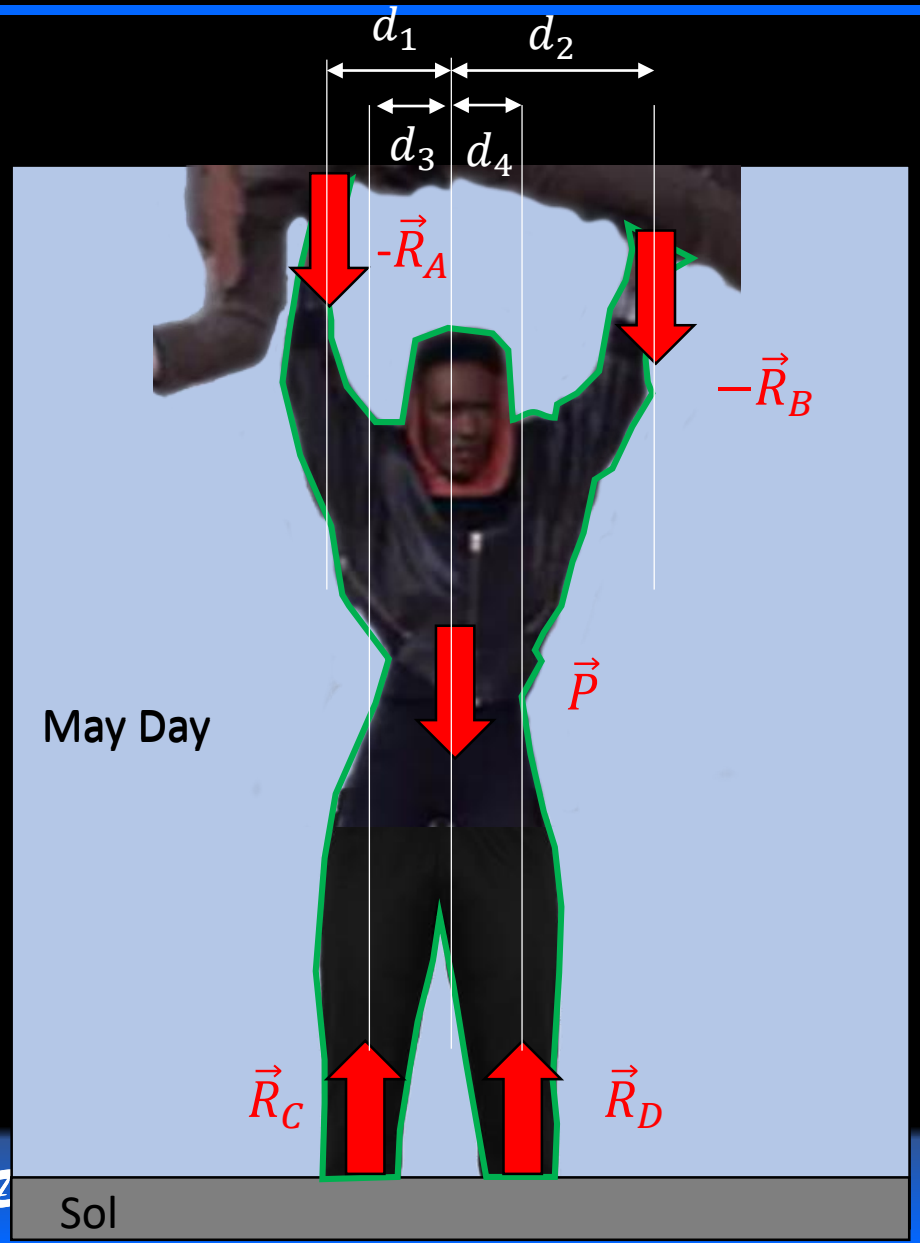
Statique du solide



Listons les moments :

- Action de l'homme de main sur May Day à la main droite
  → moment de $-\vec{R}_A$ en G : $R_A \cdot d_3$
- Action de l'homme de main sur May Day à la main gauche
  → moment de $-\vec{R}_B$ en G : $R_B \cdot d_4$
- Action du sol sur May Day au niveau du pied droit
  → moment de $\vec{R}_C$ en G : $R_C \cdot d_1$
- Action du sol sur May Day au niveau du pied gauche
  → moment de $\vec{R}_D$ en G : $R_D \cdot d_2$
- Action de la gravité sur May Day : le poids
  → moment de $\vec{P}$: moment nul

Statique du solide



Application du théorème du moment statique :

$$R_A \cdot d_3 - R_B \cdot d_4 - R_C \cdot d_1 + R_D \cdot d_2 = 0$$

On fait l'hypothèse que $d_1 = d_2 = d$ et $d_3 = d_4 = D$

➡ $R_A \cdot \mathrm{D} - R_B \cdot D - R_C \cdot \mathrm{d} + R_D \cdot d = 0$

➡ $(R_A - R_B) \cdot D + (-R_C + R_D) \cdot d = 0$

$(R_A - R_B)$: 0

➡ $R_C = R_D$

Statique du solide

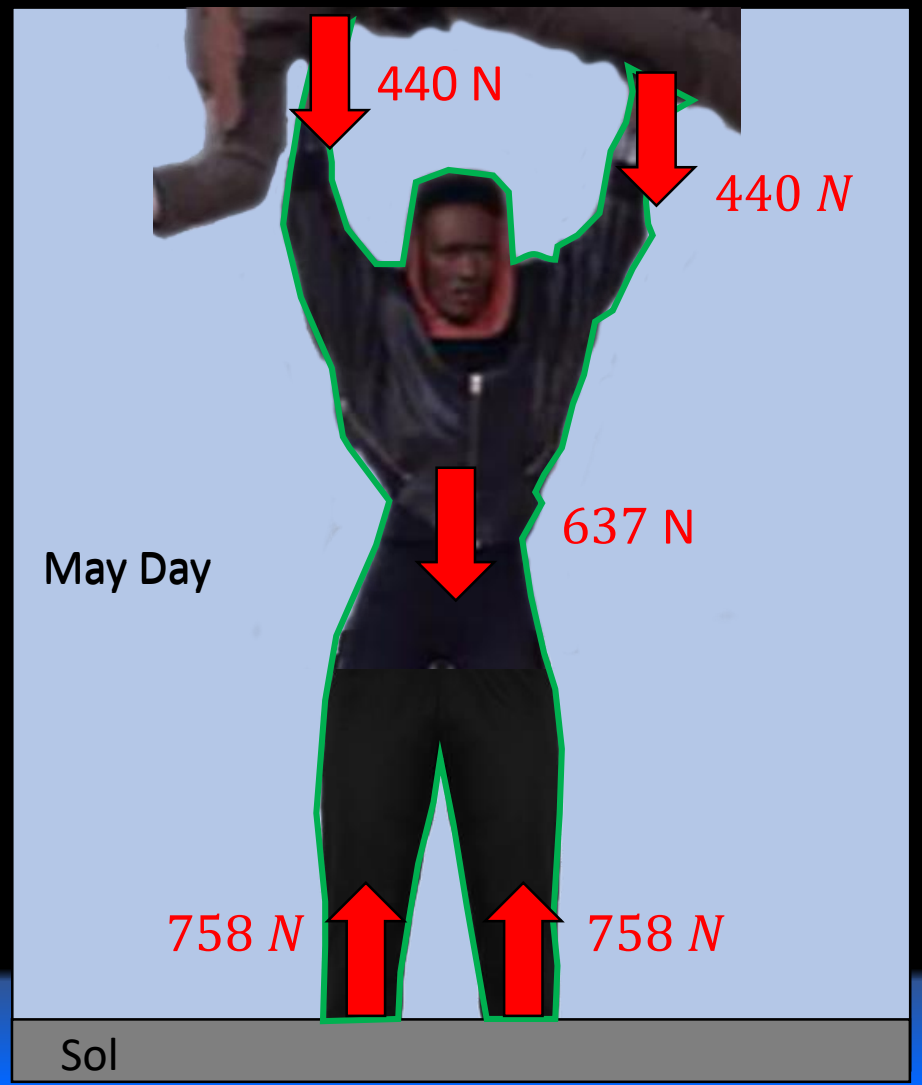
En résumé

On aboutit un système de 2 équations à 2 inconnues (système isostatique) :

$$\begin{cases} \boldsymbol{R_C} + \boldsymbol{R_D} = 1\,517\ N \\ \boldsymbol{R_C} = \boldsymbol{R_D} \end{cases}$$

On détermine les 2 inconnues :

$$\boldsymbol{R_C} = \boldsymbol{R_D} = \frac{\text{poids de John} + \text{poids de May } Day}{2} = 758\ \text{N}$$



Réaliste ou non ?

Elément de comparaison

Record mondial : femme 64 kg

Deng Wei (Chine)

En 2019 :

- À l'arraché : 117 kg
- Epaulé-jeté : 145 kg

Pourquoi pas!

Une autre application

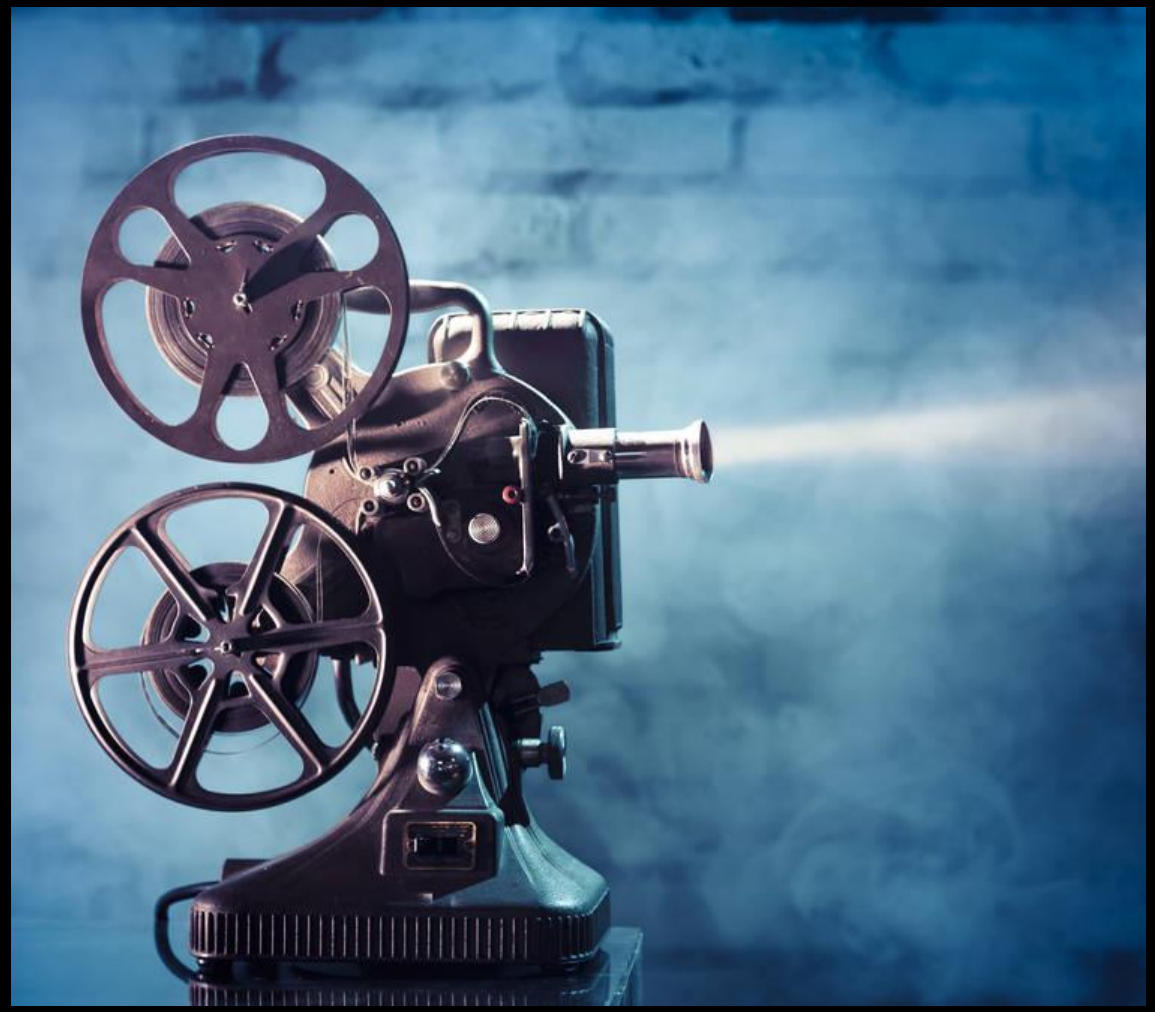
- James Bond et Requin sont au temple de Karnak (Egypte).
- Requin soulève à main nu un bloc de pierre.
- Petit calcul :
  - Masse volumique du granite : 2,75 g/cm^3
  - Volume du bloc : 1,0 m x 0,5 m x 0,3 m = 0,15 m^3

    → Résultat : environ 400 kg

Requin devrait participer aux prochains jeux olympiques !

2. Résistance des matériaux

Exemple de déformation de matériau



Extrait de « Doctor No », 1962, EON Productions

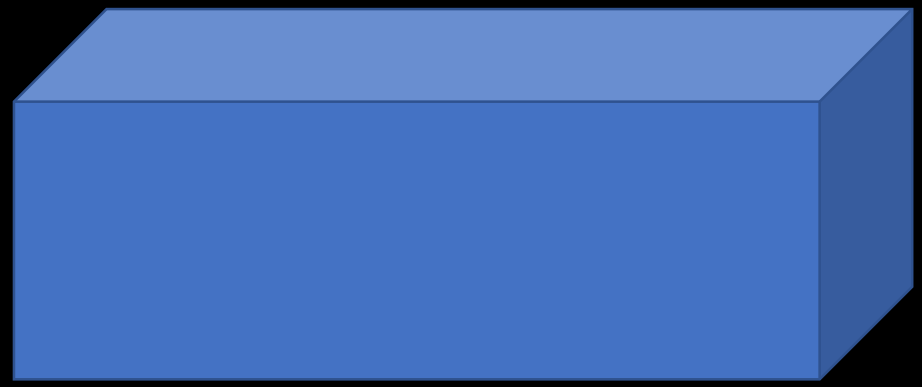
James Bond est invité à diner chez son ennemi, le Doctor No.
Ce dernier raconte ce qui est arrivé à ses mains.

https://www.youtube.com/watch?v=SUeJ94RlecM

Résistance des matériaux

Notion de force de cohésion :

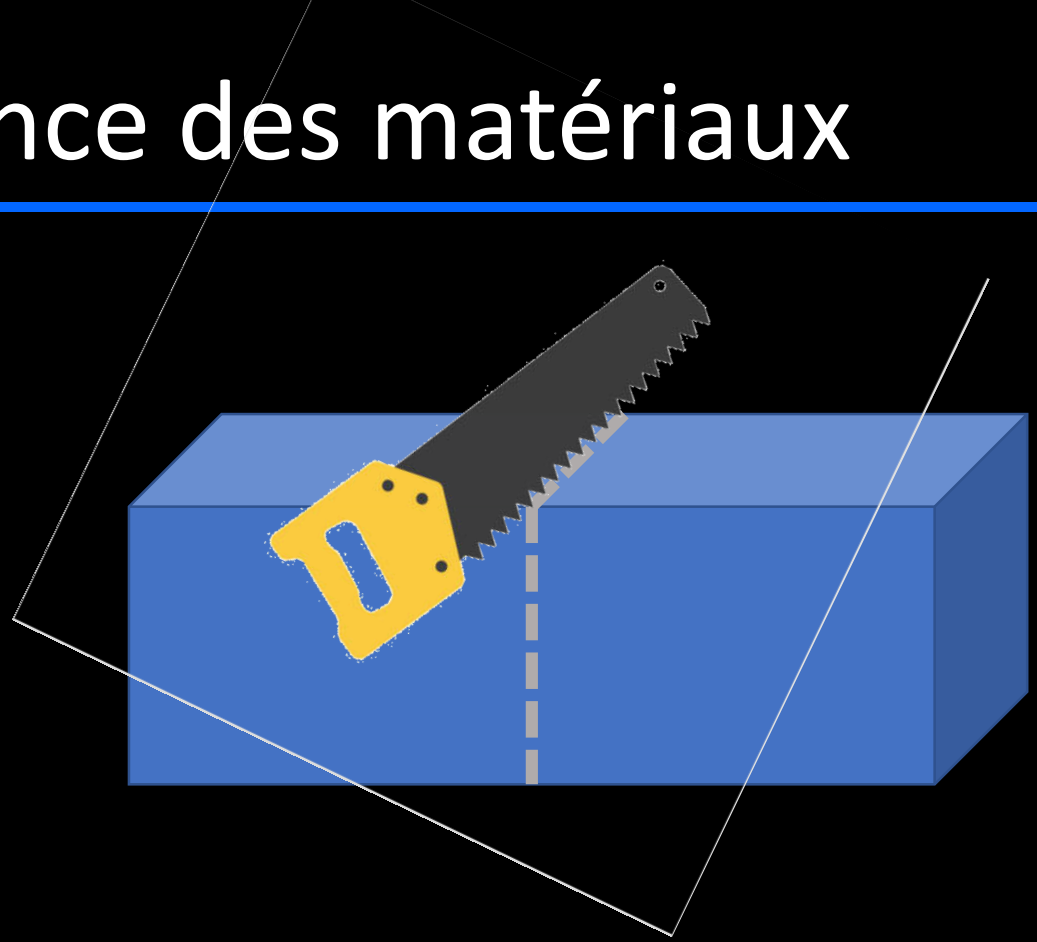
- On considère un objet parallélépipédique soumis à aucune force extérieure.



Résistance des matériaux

Notion de force de cohésion :

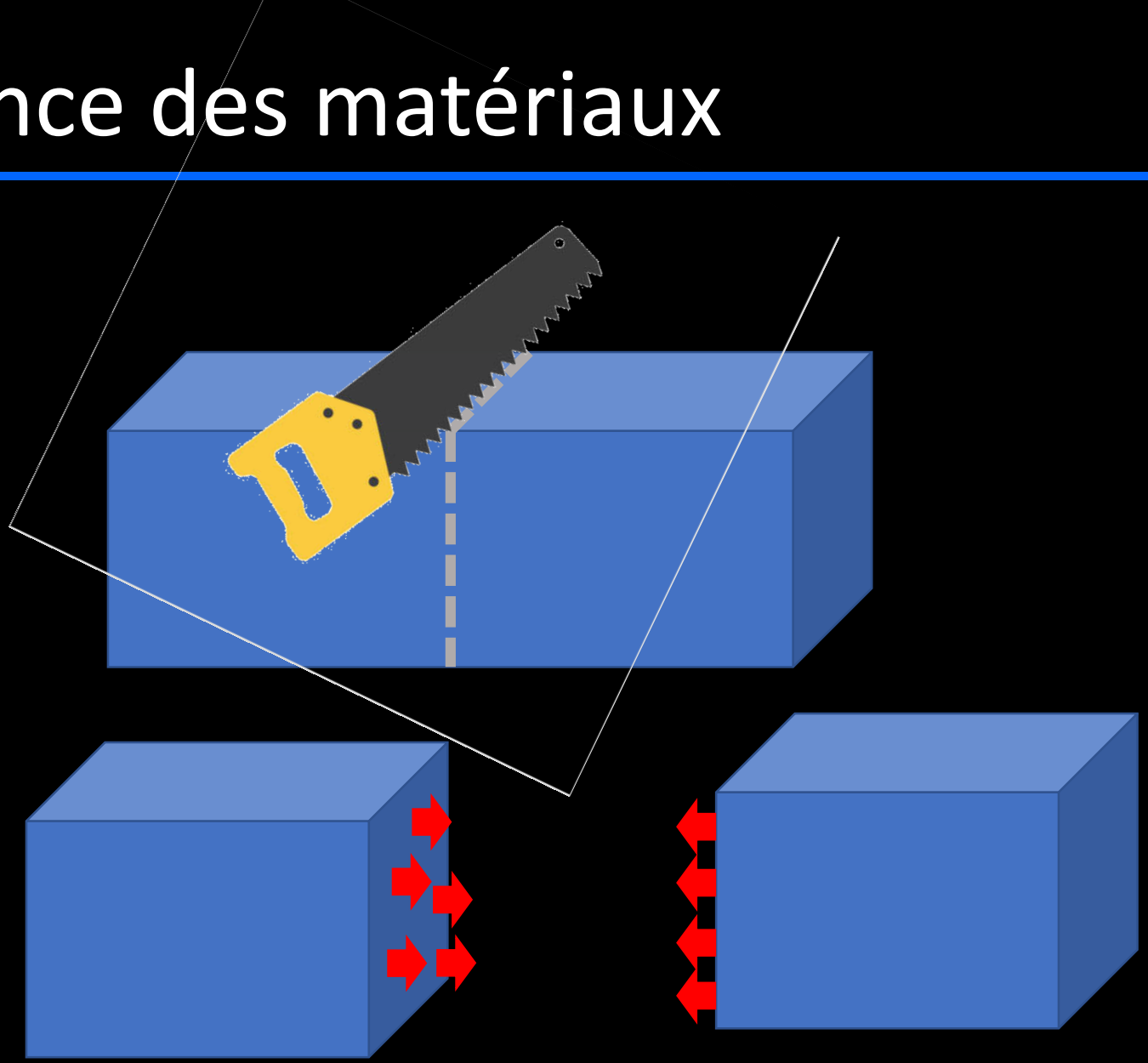
- On considère un objet parallélépipédique soumis à aucune force extérieure.
- On coupe de manière virtuelle le parallélépipède de manière transversale.



Résistance des matériaux

Notion de force de cohésion :

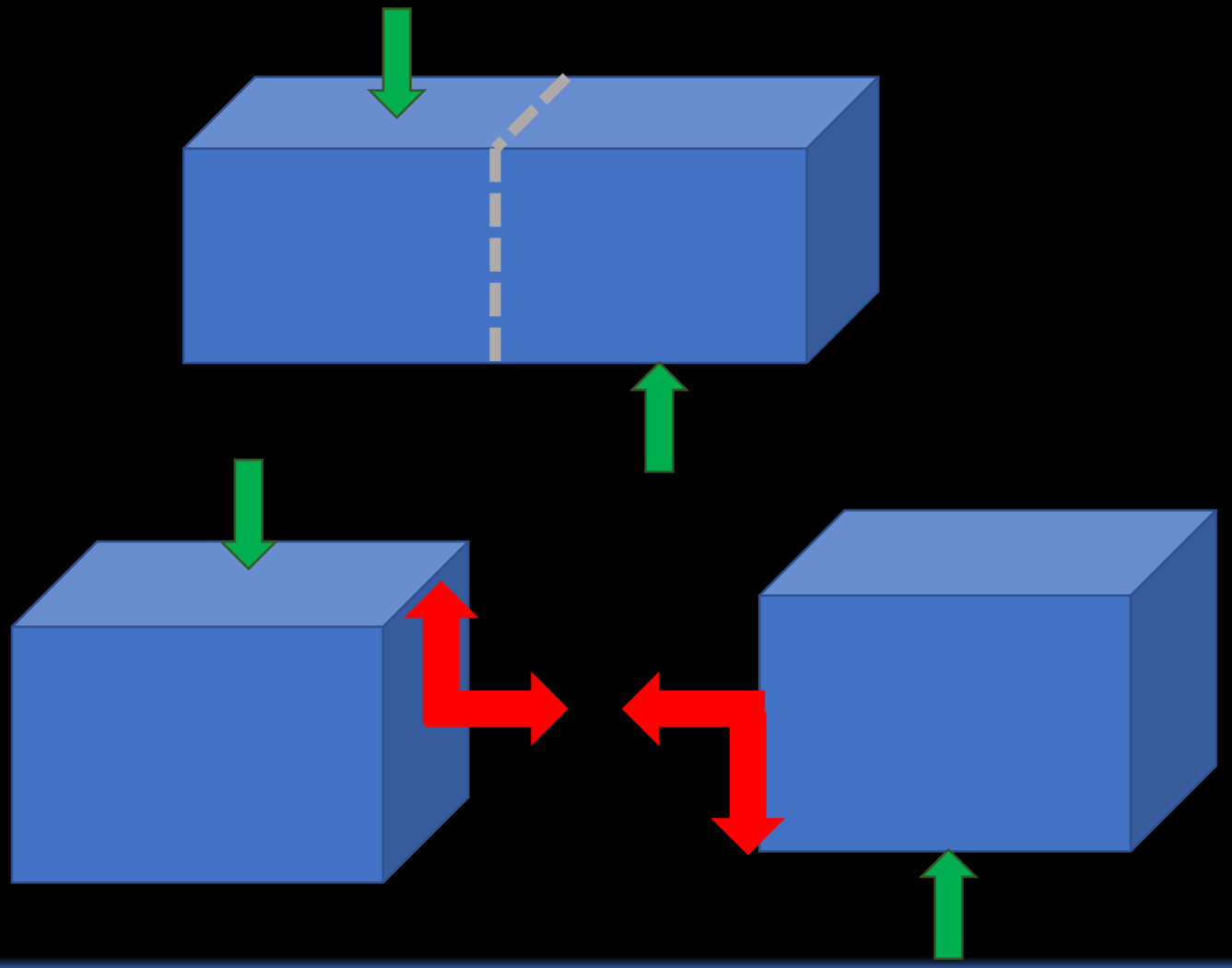
- On considère un objet parallélépipédique soumis à aucune force extérieure.
- On coupe de manière virtuelle le parallélépipède de manière transversale.
- Des forces de cohésion sont visibles entre les 2 morceaux.



Résistance des matériaux

Notion de force de cohésion :

- Si le parallélépipède est soumis à des forces extérieures, les forces de cohésion sont impactées et doivent les compenser.
- C'est le principe fondamental de la statique qui permet de déterminer l'intensité des forces de cohésion.

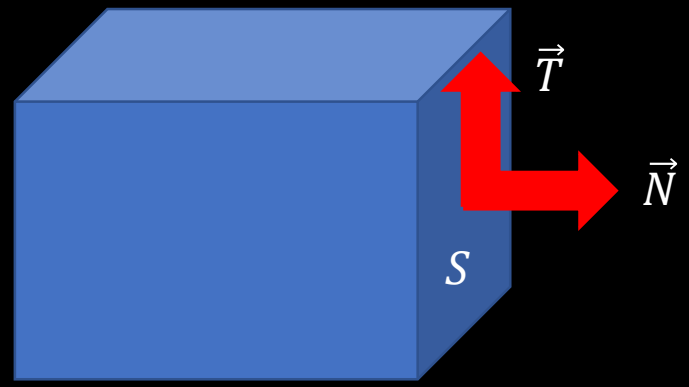


Résistance des matériaux

Notion de force de cohésion :

- Généralement on préfère travailler avec des densité de force : une force sur une surface que l'on appelle contrainte.

$$contrainte = \frac{force}{surface}$$ [en $N.m^{-2}$ = Pa]



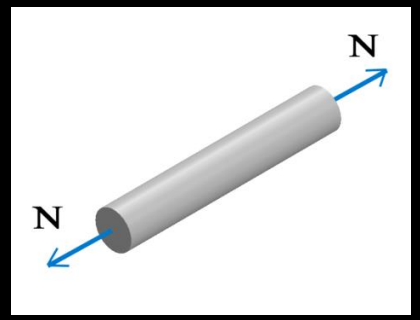
On peut définir :

- une contrainte normale (orthogonale à la section) : $\sigma = \frac{N}{S}$
- Une contrainte tangentielle (parallèle à la section) : $\tau = \frac{T}{S}$

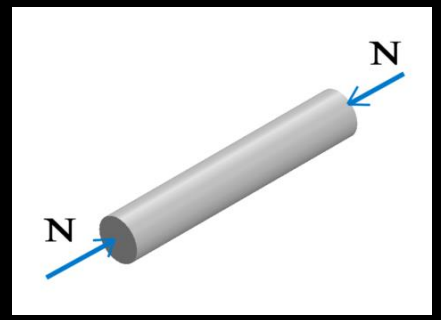
Les sollicitations élémentaires

Hypothèse : on considère un objet de forme cylindrique

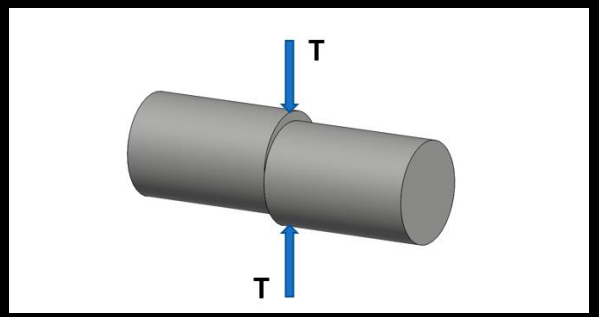
On peut classer les sollicitations mécaniques en 5 déformations élémentaires :



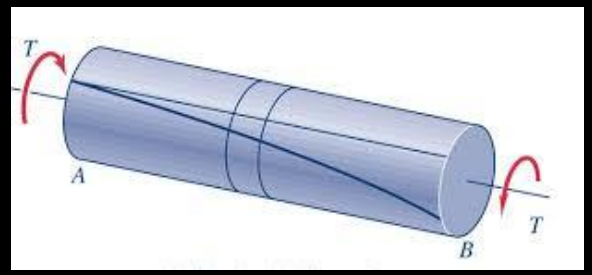
traction



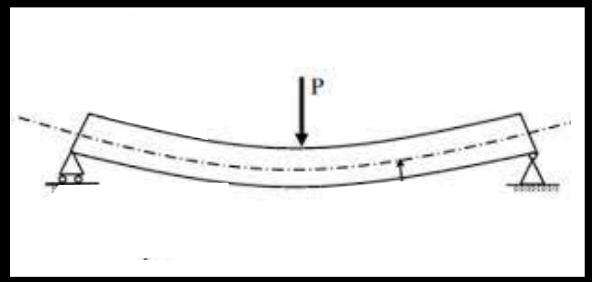
compression



cisaillement



torsion



flexion

Dans le cas général, toute sollicitation peut être vue comme la superposition de ces sollicitations élémentaires.

Comportement du matériau

Prenons une règle en polymère.

- Si on applique aucune sollicitation mécanique, la règle reste bien droite.
- Si on applique une sollicitation mécanique, la règle se déforme et se plie. Si on relâche l'effort, la règle reprend sa forme initiale.
  → déformation élastique
- Si on applique une sollicitation plus importante, la règle se déforme et se plie. Si on relâche l'effort, la règle ne reprend plus sa forme originale : elle possède une déformation résiduelle.
  → déformation plastique
- Si la sollicitation est très forte, la règle casse.

Comportement du matériau

Prenons une règle en polymère.

- Si on applique aucune sollicitation mécanique, la règle reste bien droite.
- Si on applique une sollicitation mécanique, la règle se déforme et se plie. Si on relâche l'effort, la règle reprend sa forme initiale.
  → déformation élastique

Limite d'élasticité

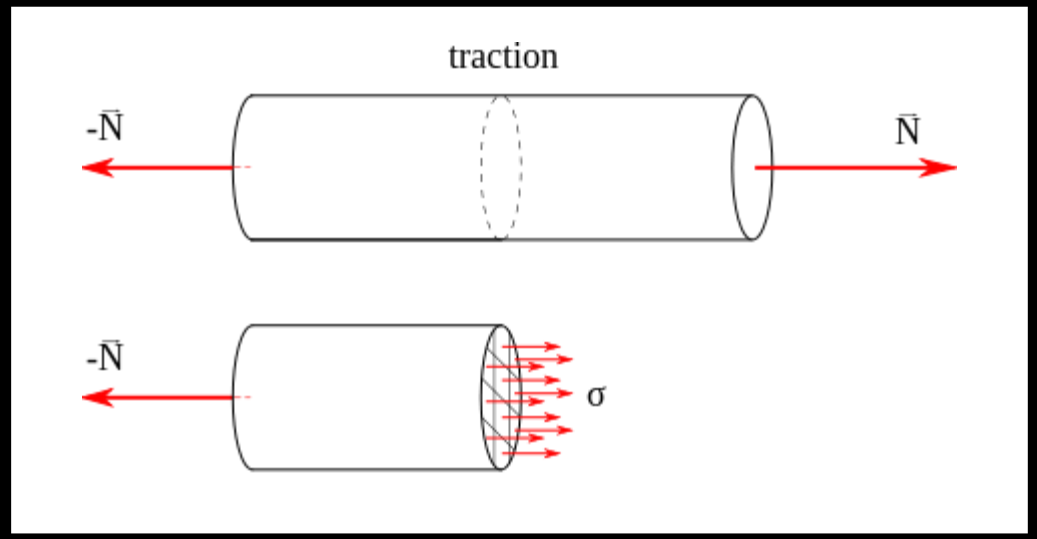
- Si on applique une sollicitation plus importante, la règle se déforme et se plie. Si on relâche l'effort, la règle ne reprend plus sa forme originale : elle possède une déformation résiduelle.
  → déformation plastique

Limite à la rupture

- Si la sollicitation est très forte, la règle casse.

3. Exemple de traction

La traction



Loi de comportement dans le domaine élastique :
= Augmentation de la longueur

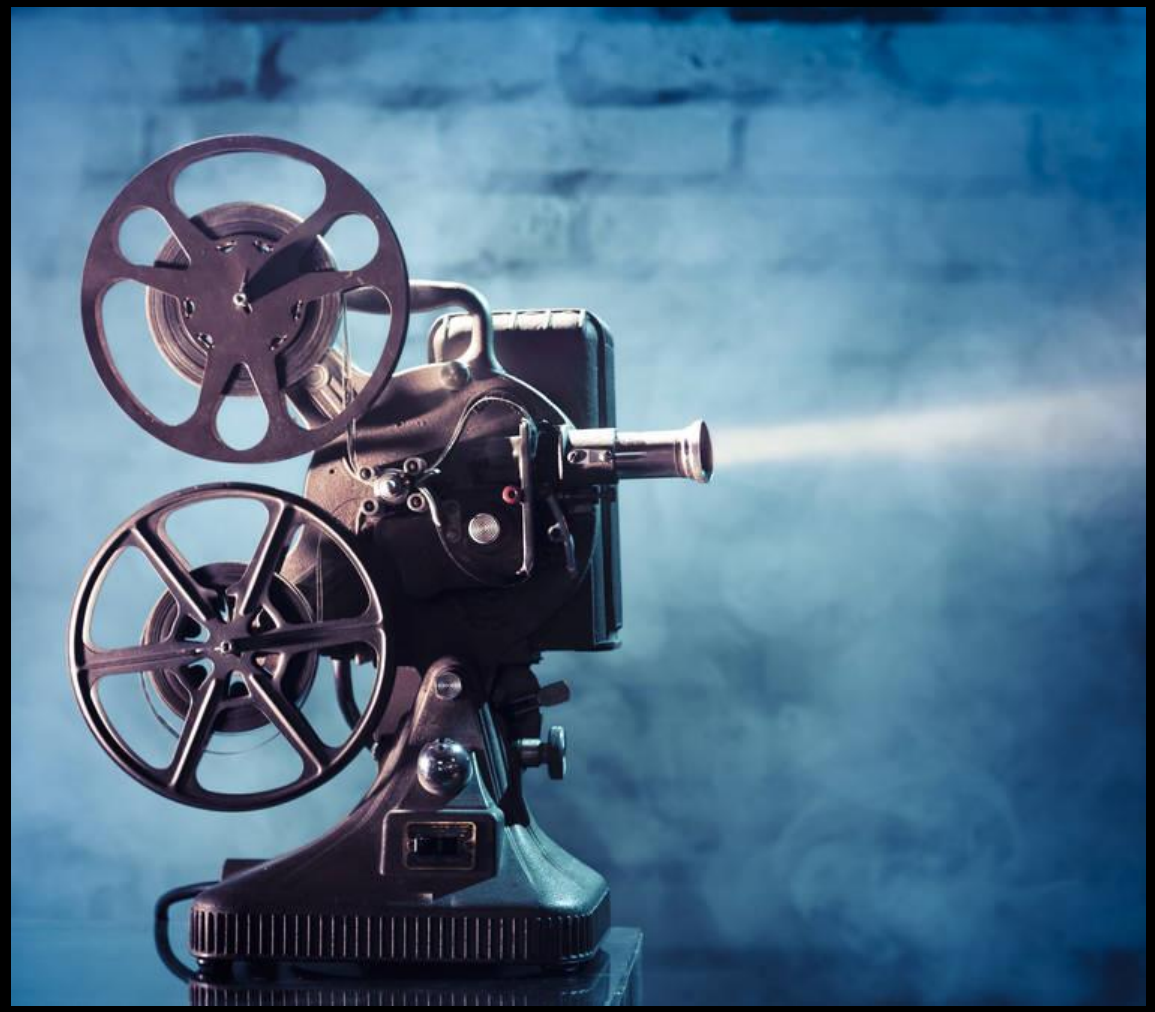
$$\sigma = E \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

Avec E le module de Young (en Pa)

Propriétés mesurables lors d'un essai de traction

- Le module de Young
- La limite d'élasticité pour la traction R_e
- La limite à la rupture pour la traction R_m

Exemple de traction

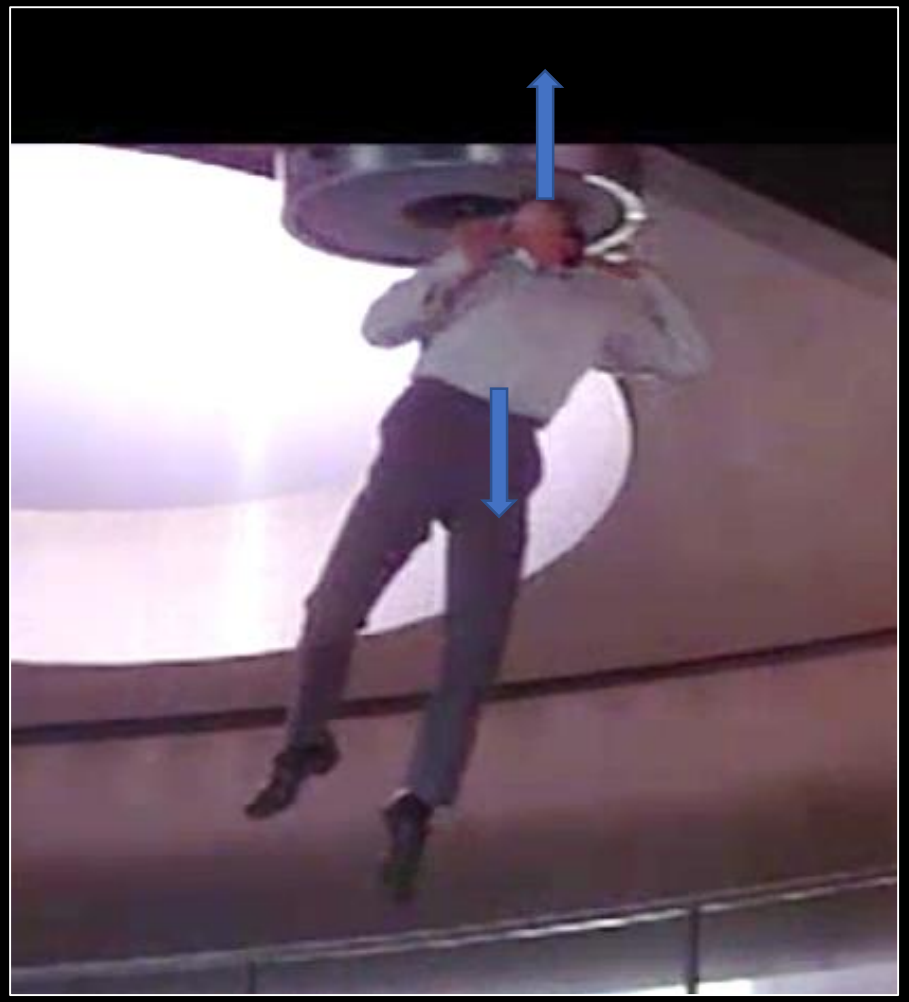


Extrait de « L'espion qui m'aimait », 1977, EON Productions

James Bond rencontre de nouveau le tueur Requin et il doit s'en débarrasser rapidement.

https://www.youtube.com/watch?v=7Y_Y4xSdLA8

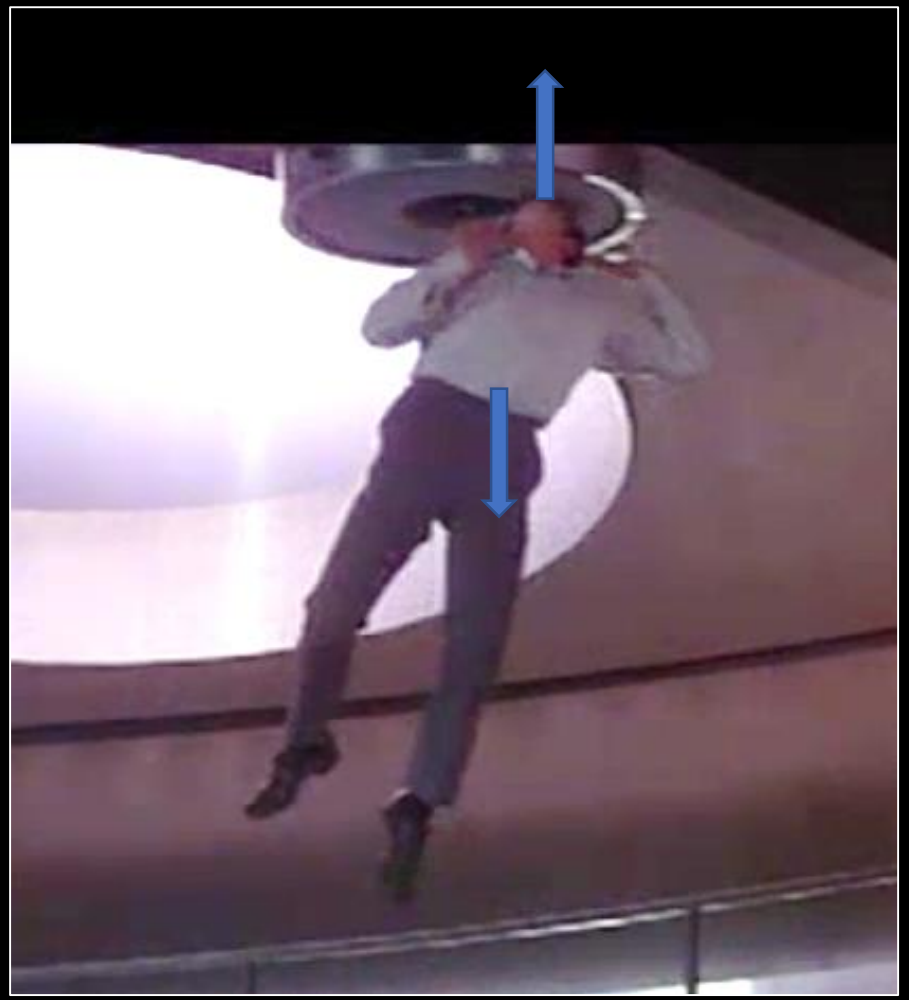
La traction

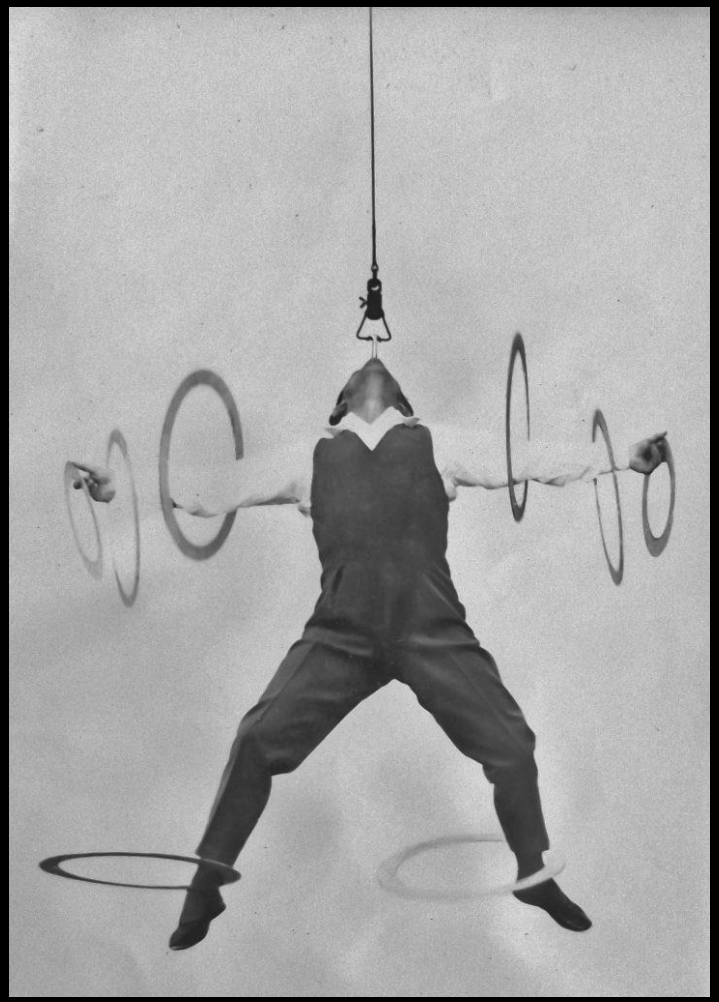


- Problème ici : le matériau = corps humain
  Le corps humain n'est pas homogène isotrope.
  → On ne peut pas parler du module de Young ou limite d'élasticité pour le corps humain.

- Il faut décomposer le corps humain :
  - On suppose que le dentier en acier résiste à l'essai de traction.
  - Qu'en est-il de la mâchoire ?
  - Qu'en est-il des muscles ? (muscle masséter par exemple)

La traction

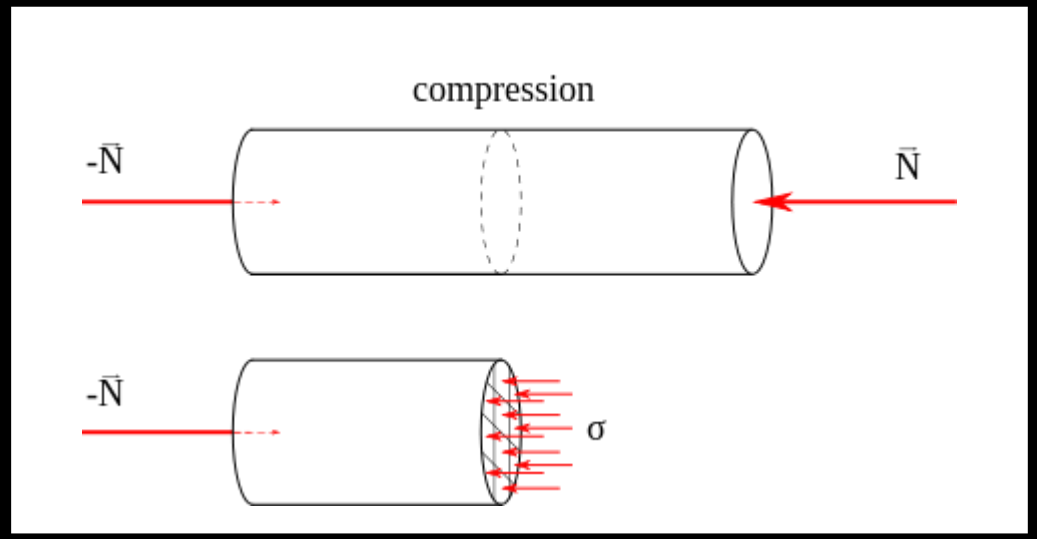




Bert Holt dans les années 1940

4. Exemple de compression

La compression

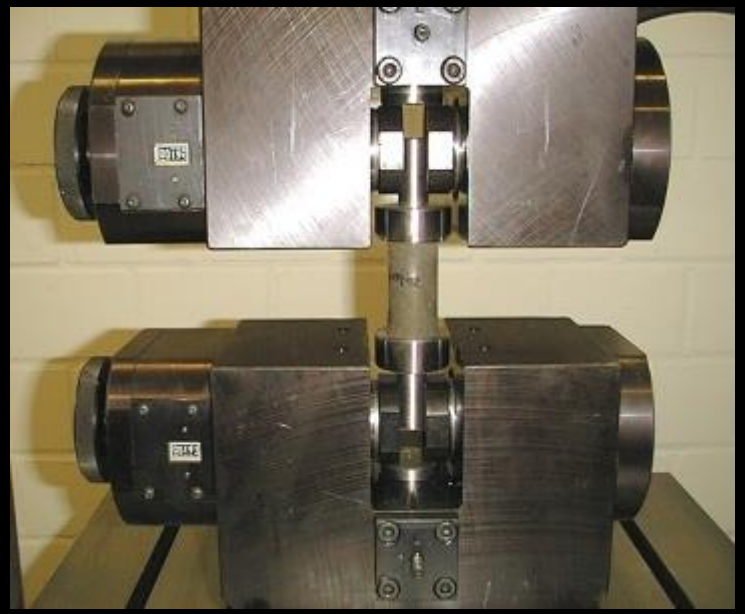


Loi de comportement dans le domaine élastique :
= Diminution de la longueur

$$\sigma = E \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

Avec E le module de Young (en MPa)

Propriétés mesurables lors d'un essai de compression

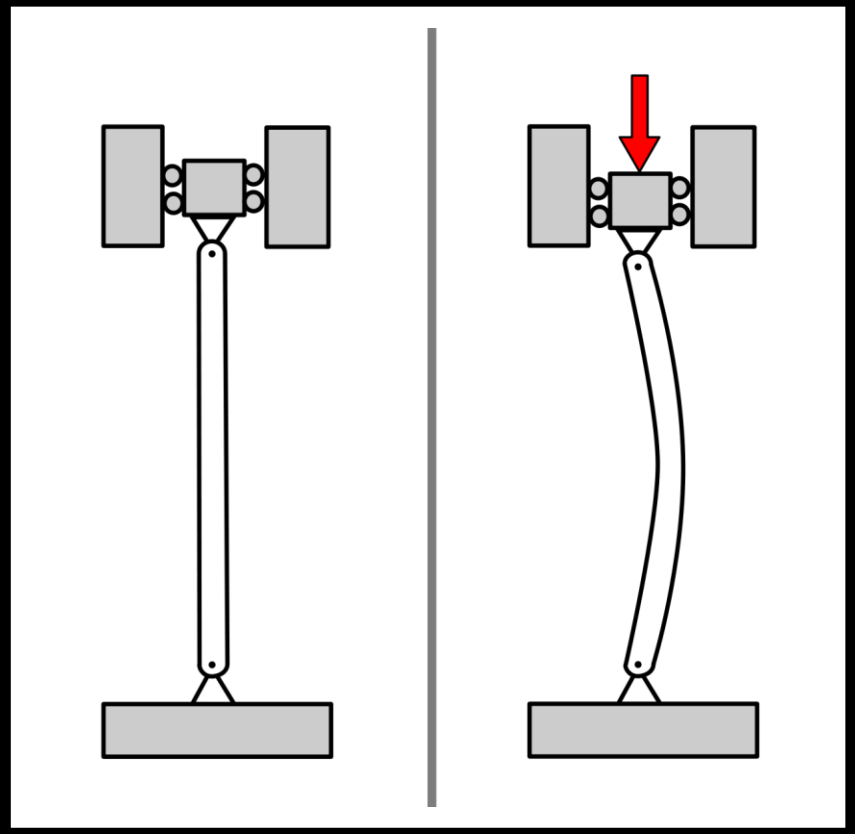


- Le module de Young (identique à celui de la traction)
- La limite d'élasticité pour la compression $R_{ec} \approx R_e$
- La limite à la rupture pour la compression R_{mc}

La compression

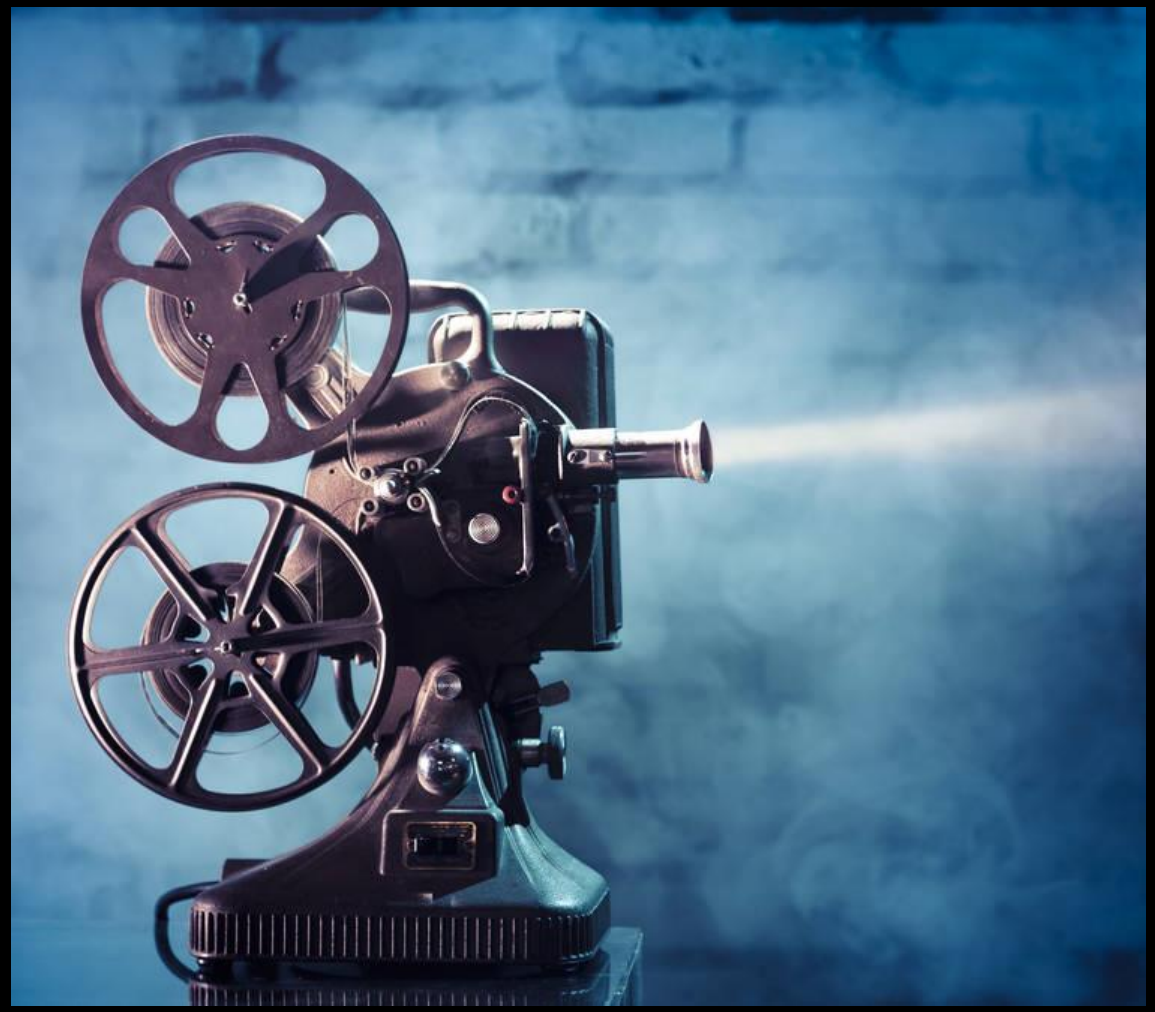
Attention : la loi de comportement de la compression fonctionne pour des objets pas trop élancés.

Que se passe-t-il pour des objets élancés ?



Phénomène connu sous le nom de flambage ou flambement

La compression

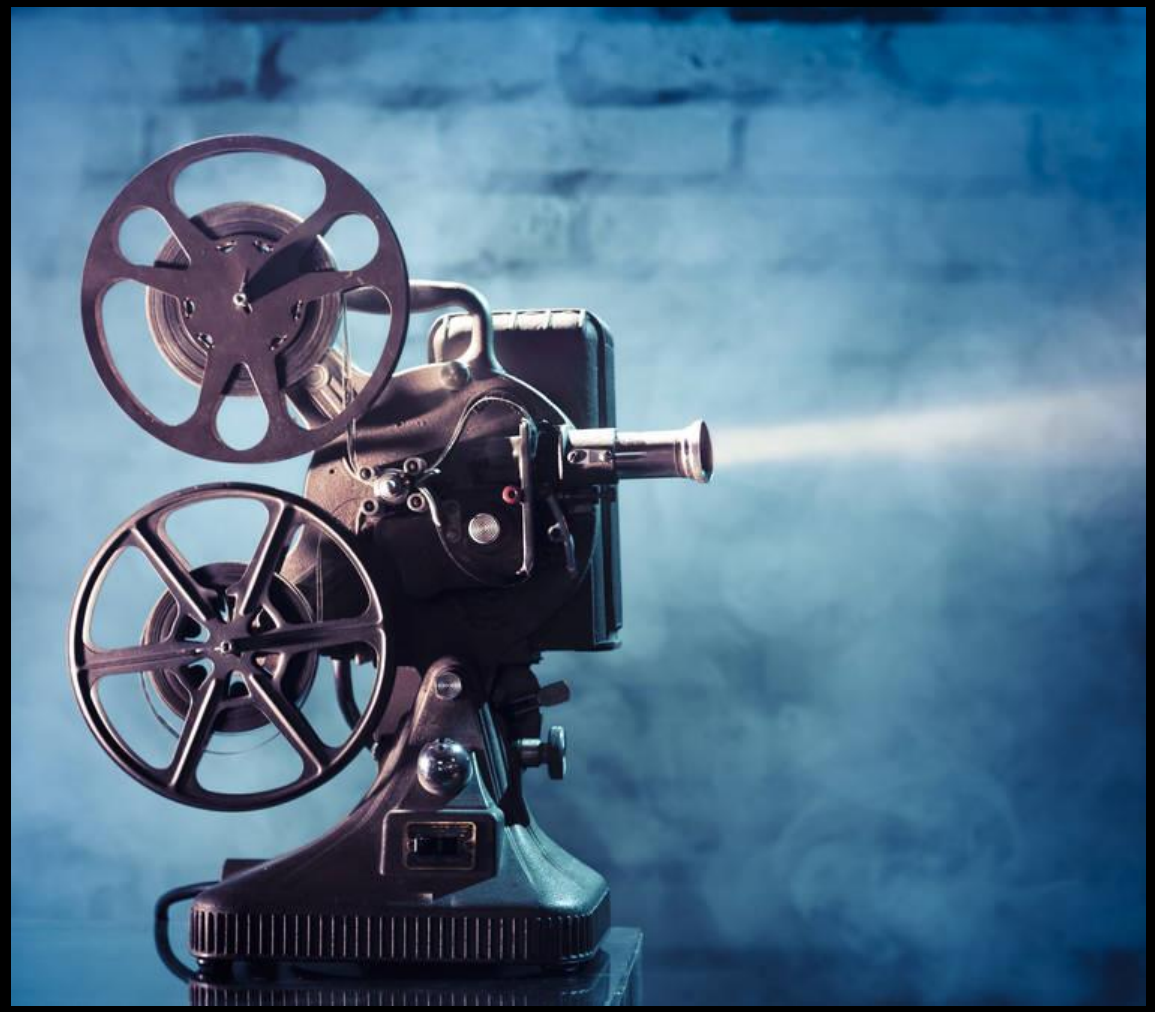


Extrait de « Goldfinger », 1964, EON Productions

James Bond vient tout juste de battre Goldfinger lors d'une partie de golf. Goldfinger et son bras droit, Odd job, sont particulièrement contrariés.

https://www.youtube.com/watch?v=kUiQHwj4OlE

La compression



Extrait de « Octopussy », 1983, EON Productions

Dans un casino indien, James Bond vient tout juste de battre le prince Kamal Khan lors d'une partie de backgammon. Kamal Khan et son bras droit, Gobinda, sont particulièrement contrariés.

https://www.youtube.com/watch?v=tBz2GIxfYXA

Qui est le plus fort ?

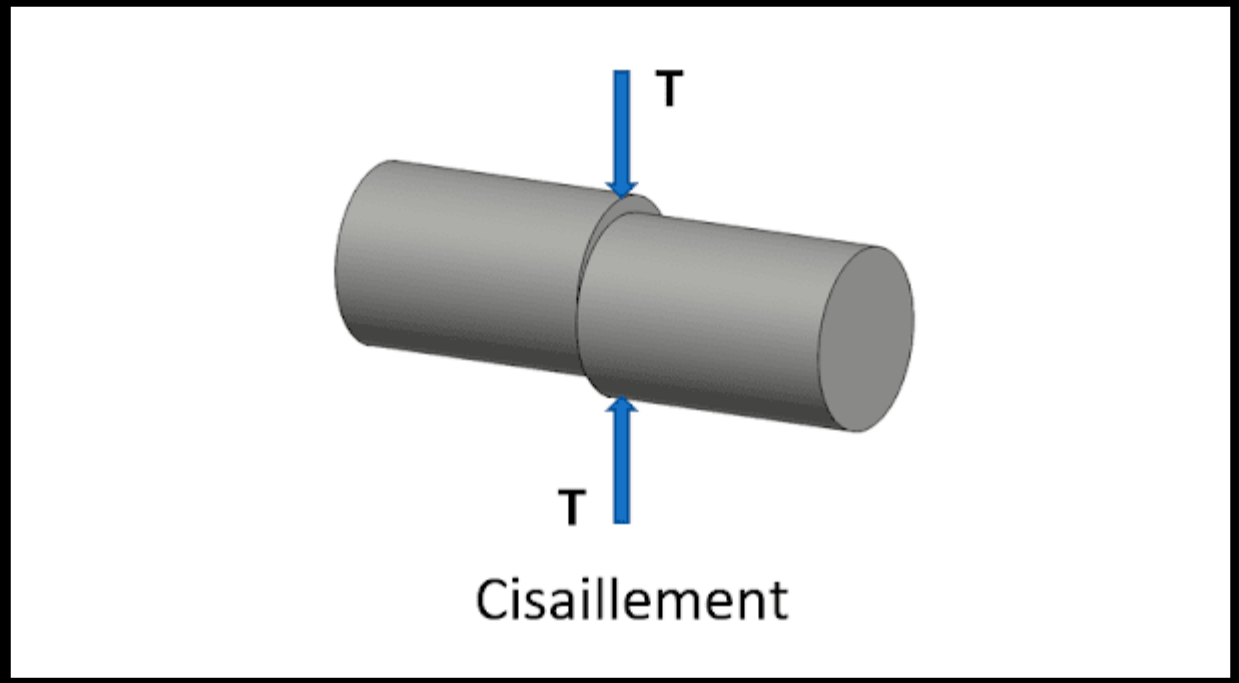
Oddjob

VS

Gobinda

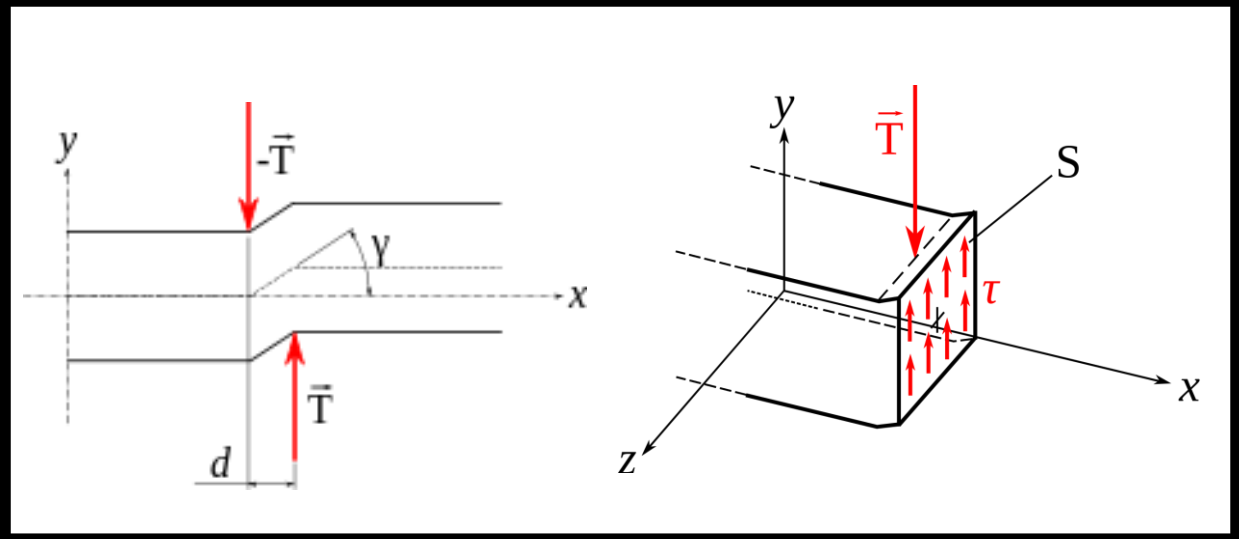
5. Exemple d’un cisaillement

Le cisaillement



Cas idéal

Le cisaillement

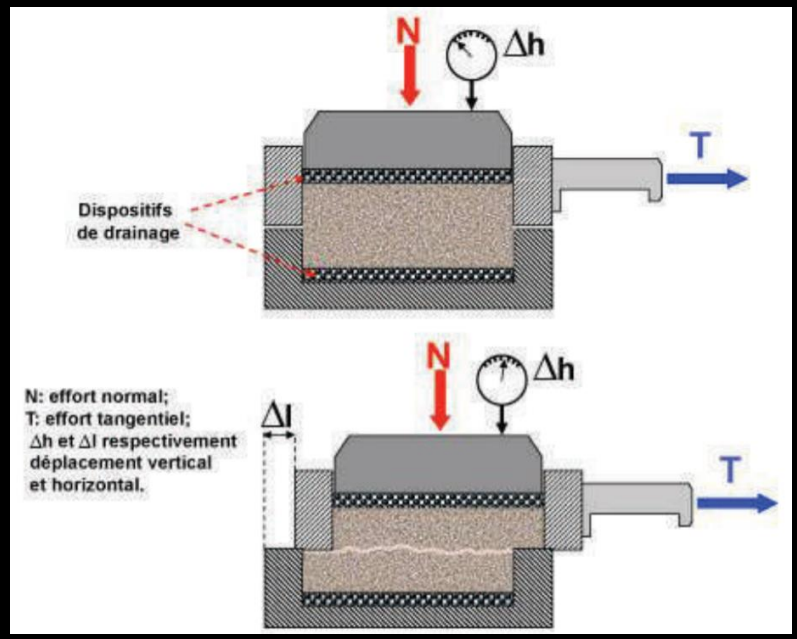


Loi de comportement dans le domaine élastique :
= augmentation du glissement γ

$$\tau = G \cdot \gamma$$

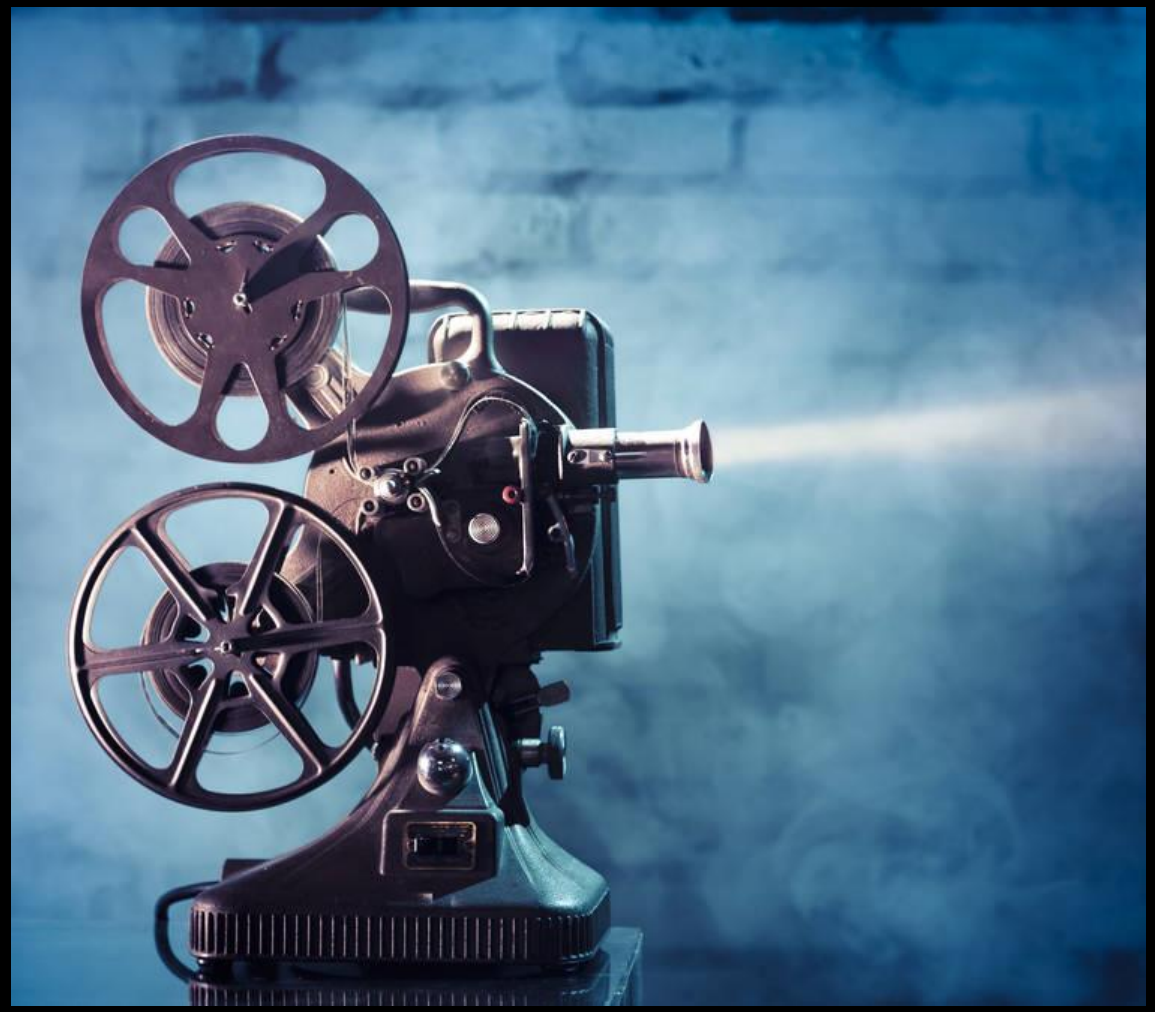
Avec G le module de Coulomb (en Pa)

Caractéristiques mesurables par essais de cisaillement



- Le module de Coulomb
- La limite d'élasticité au cisaillement τ_e
- La limite à la rupture au cisaillement τ_r

Le cisaillement



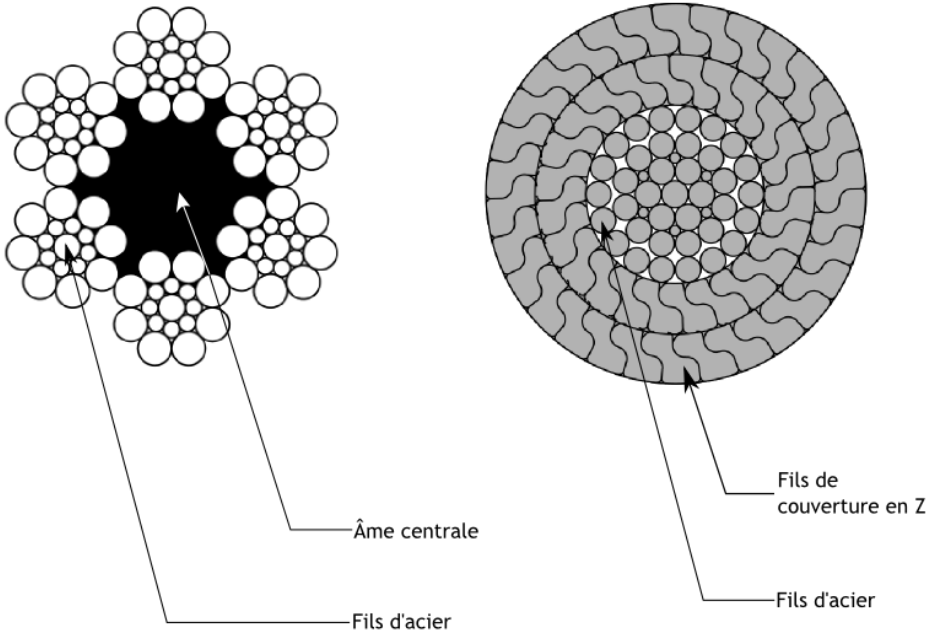
Extrait de « Moonraker », 1979, EON Productions

James Bond et le Dr. Holly Goodhead visitent Rio et empruntent le téléphérique. Ils ne se doutent pas un seul instant que leur moment de complicité sera interrompu par l'arrivée impromptue de Requin.

https://www.youtube.com/watch?v=cVCL-0SoIgA

Le cisaillement

https://montagne-cable.legtux.org/



câbles tracteur **câbles porteur**

D'ordinaire les câbles sont sollicités aux phénomènes de traction, torsion, flexion.

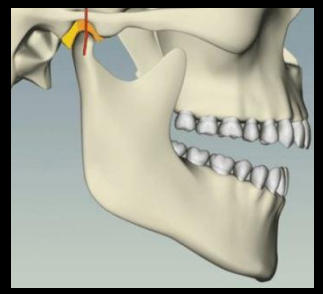
Hypothèses :

- Prenons l'exemple de l'acier : Acier S235
- Résistance à la rupture pour le cisaillement : Rmg = 56 $N.mm^{-2}$
- Diamètre de la section de câble : 7cm

Calcul :

- Section du câble : 38,5 cm^2
- Effort tranchant : 215 kN

Le cisaillement



- Mâchoire humaine normale : 58 kg / cm² = 5,6 N.mm^{-2}

- Il faudrait une mâchoire de requin pour y parvenir.

- Dans le cas de Requin, même problème que pour la traction :
  - Résistance du dentier en acier : OK
  - Résistance des muscles ?
  - Résistance de la mâchoire ?

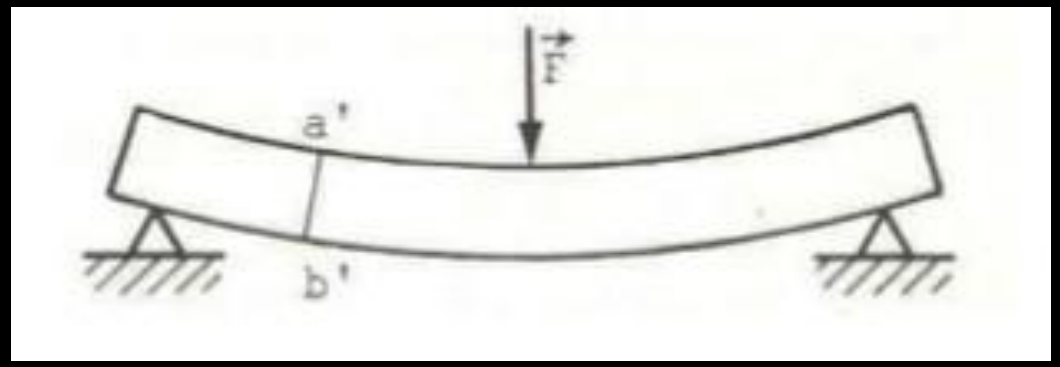
REJETE !

Hypothèses :
- Prenons l'exemple de l'acier : Acier S235
- Résistance à la rupture pour le cisaillement : R^{mg} = 56 N.mm^{-2}
- Diamètre de la section de câble : 7cm

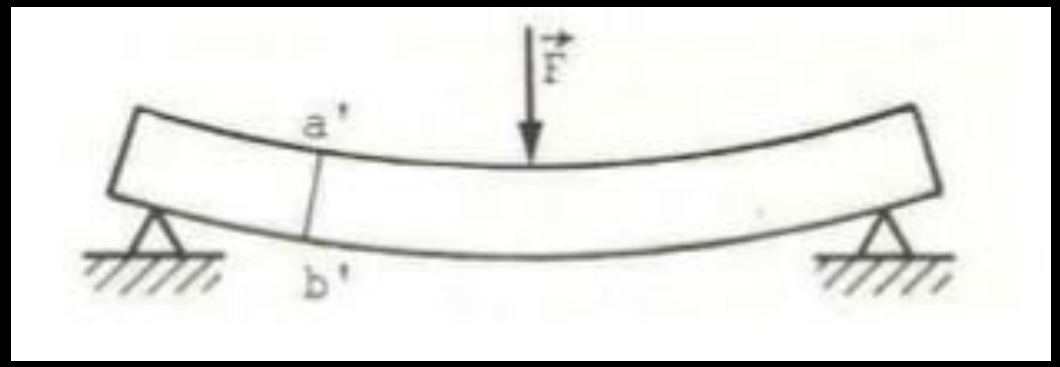
Calcul :
- Section du câble : 38,5 cm²
- Effort tranchant : 215 kN

6. Exemple d’une flexion

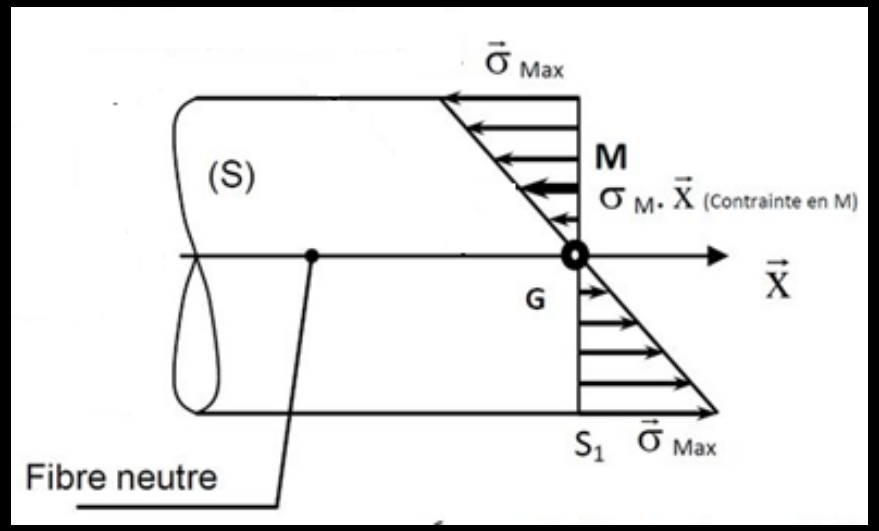
La flexion simple



La flexion simple



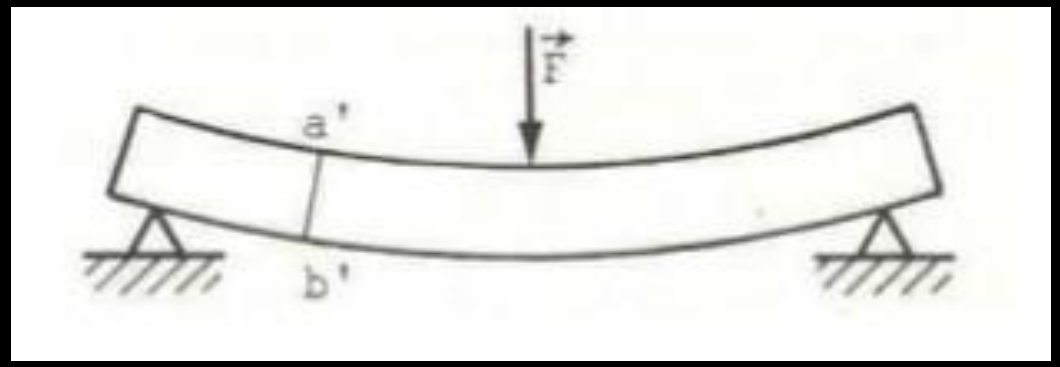
Hypothèse simplificatrice : on considère un rayon de courbure très petit



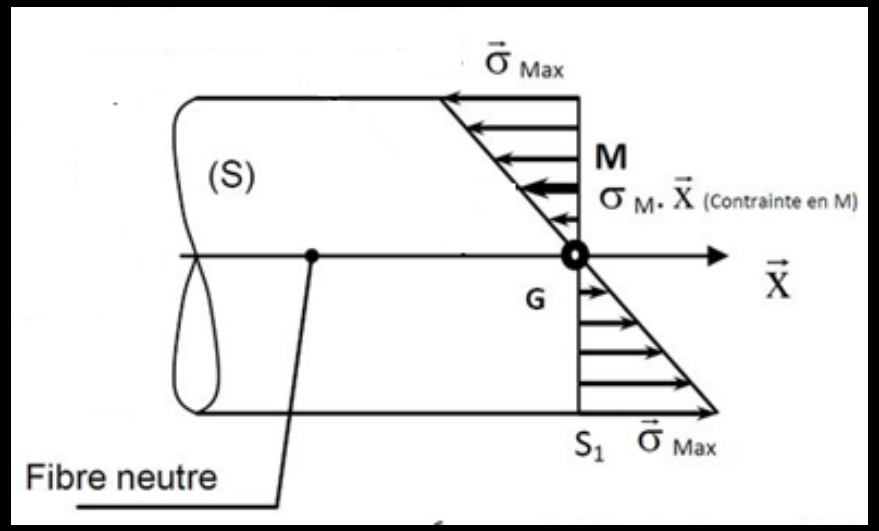
Les fibres en dessus de la fibre neutre sont en compression.

Les fibres en dessous de la fibre neutre sont en traction.

La flexion simple



Hypothèse simplificatrice : on considère un rayon de courbure très petit



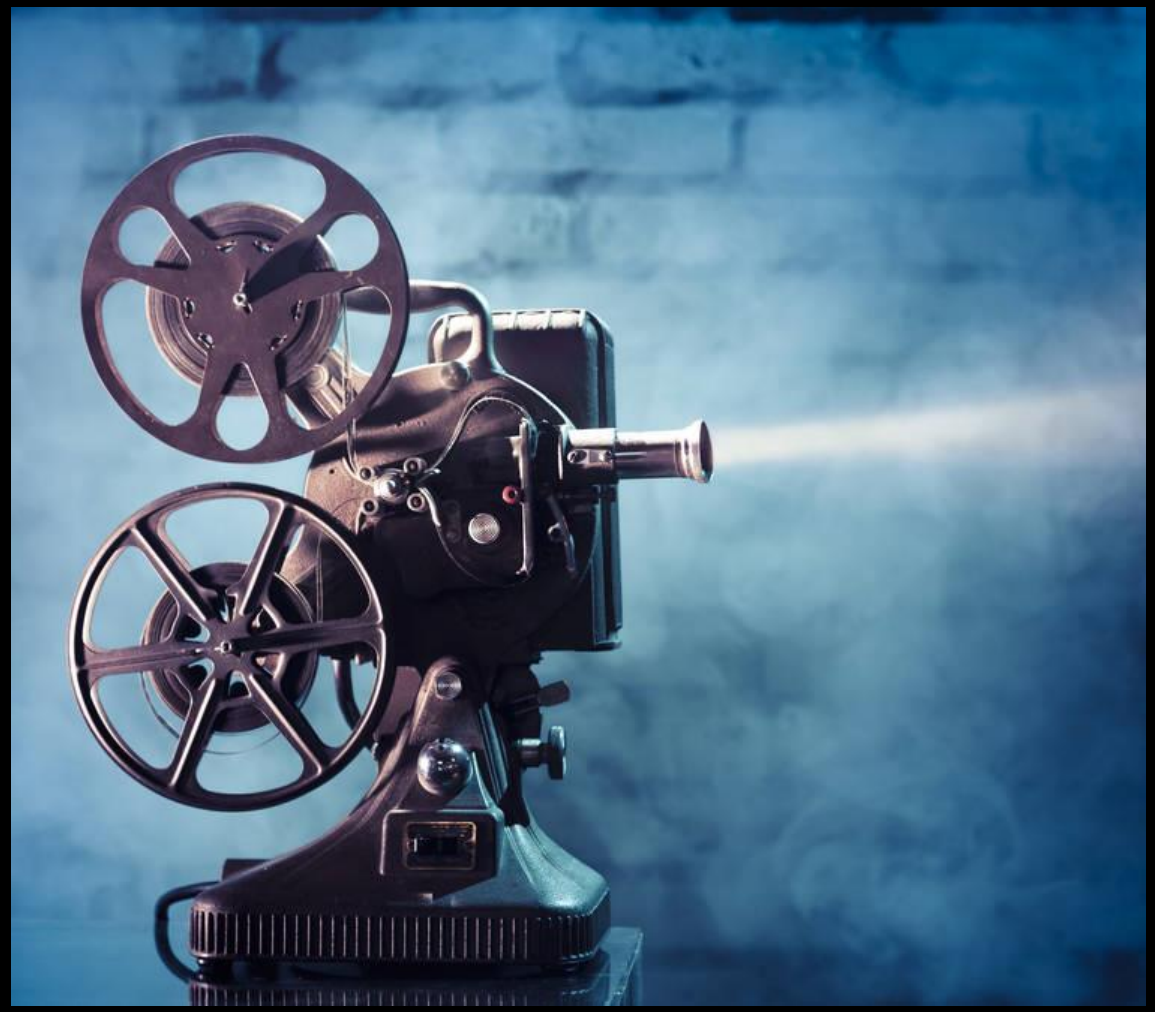
Les fibres en dessus de la fibre neutre sont en compression.

Les fibres en dessous de la fibre neutre sont en traction.

La résistance des matériaux pour la flexion s'établit par la fibre la plus extérieure : la **fibre critique**.

- On utilise les limites en **compression** si la fibre critique est au dessus de la fibre neutre.
- On utilise les limites en **traction** si la fibre critique est en dessous de la fibre neutre.

Exemple de flexion



Extrait de « Vive et laisser mourir », 1973, EON Productions

James Bond est capturé dans un bar de Harlem par le gang de Mr Big. Tee Hee montre à notre héros qu'il n'est pas là pour plaisanter.

https://www.youtube.com/watch?v=CPmdrJEvGn4

Modélisation de la sollicitation

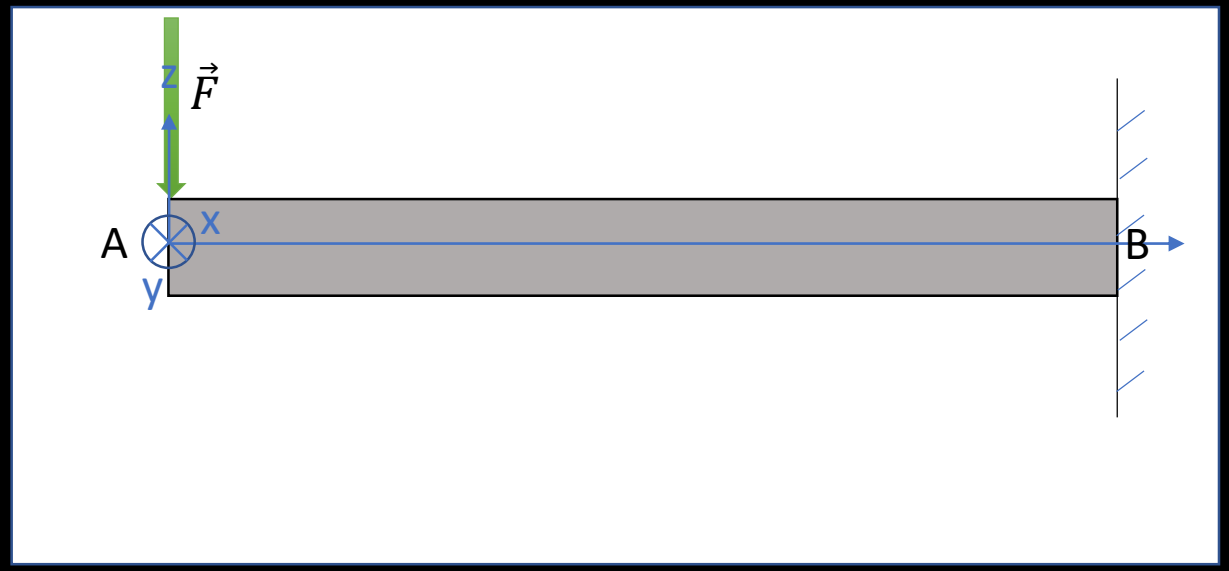
Walther PPK

Modélisation de la sollicitation

Liaison ponctuelle

Liaison encastrement

Modélisation de la sollicitation



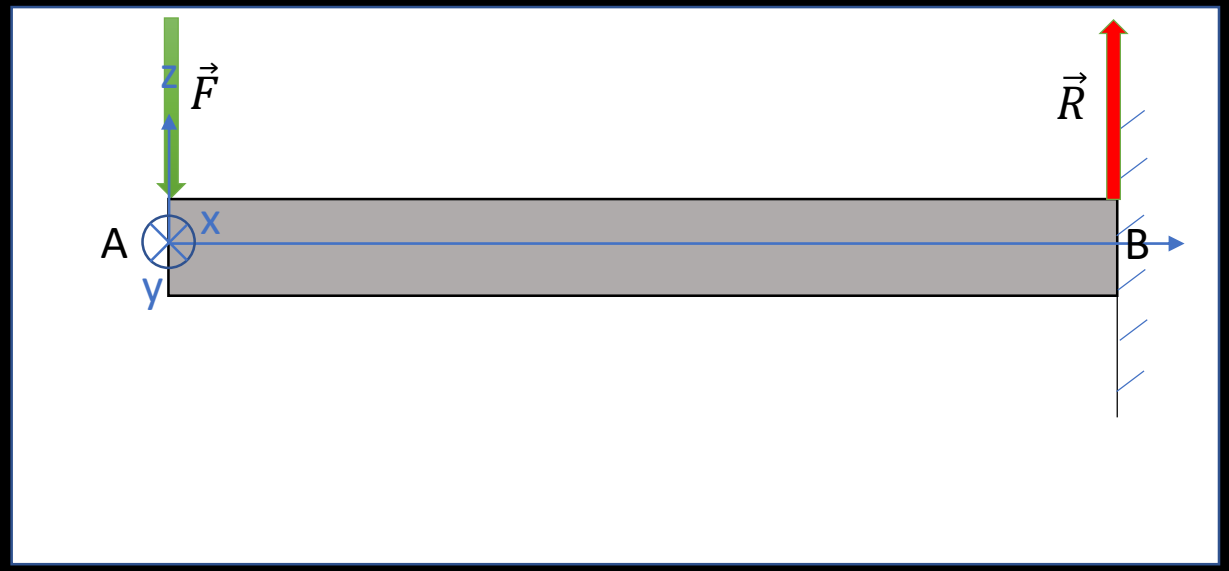
Système étudié : le canon du pistolet

On trace la frontière d'isolement.

Bilan des actions mécaniques exercées sur le canon :

- Action de la main bionique en A
- Action de la main normale en B (encastrement)

Etude la flexion simple



Description en terme de force

Bilan des actions mécaniques exercées sur le canon :

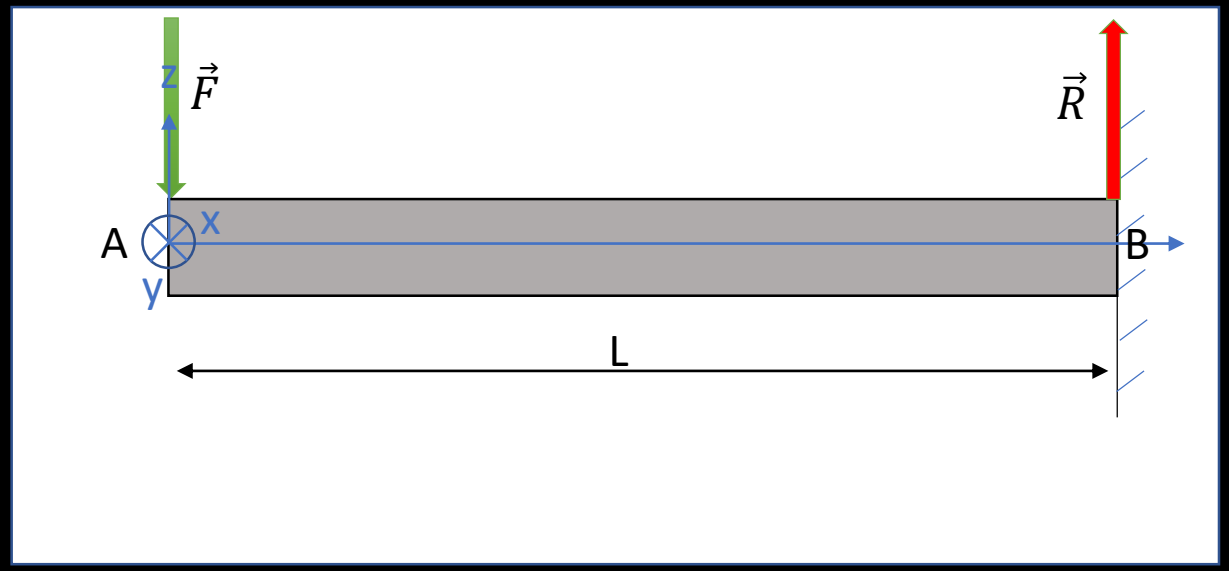
- Action de la main bionique en A
  → force ponctuelle $\vec{F}$
- Action de la main normale en B (encastrement)
  → force ponctuelle $\vec{R}$

Théorème de la résultante statique :

$$\vec{F} + \vec{R} = \vec{O}$$

$$\boxed{F = R}$$

Etude la flexion simple



Description en terme de moment avec B comme point de référence.

Bilan des actions mécaniques exercées sur le canon :

- Action de la main bionique en A
  → moment $\vec{M}_A$ associé à $\vec{F}$ dont l'intensité est :
  $F \cdot L$

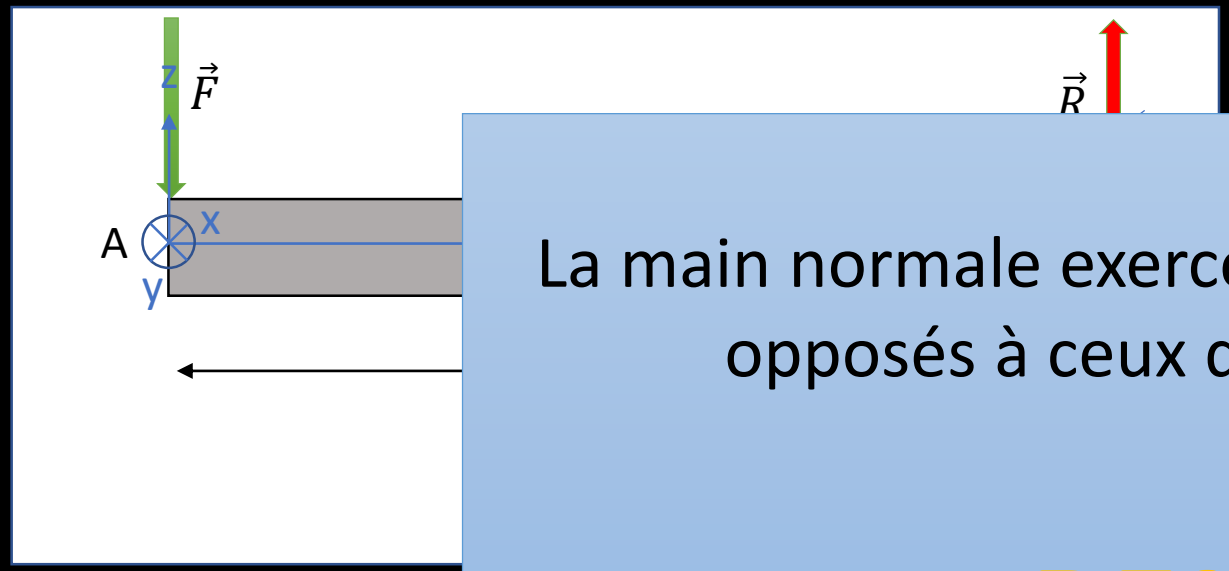
- Action de la main normale en B (encastrement)
  → moment $\vec{M}_B$ inconnu

Théorème du moment statique :

$$\vec{M}_A + \vec{M}_B = \vec{O}$$

$$\boxed{M_B = F \cdot L}$$

Etude la flexion simple



Description en terme de moment avec B comme point de référence

s sur le canon :

A

nt l'intensité est :

B (encastrement)

La main normale exerce une force et un moment opposés à ceux de la main bionique.

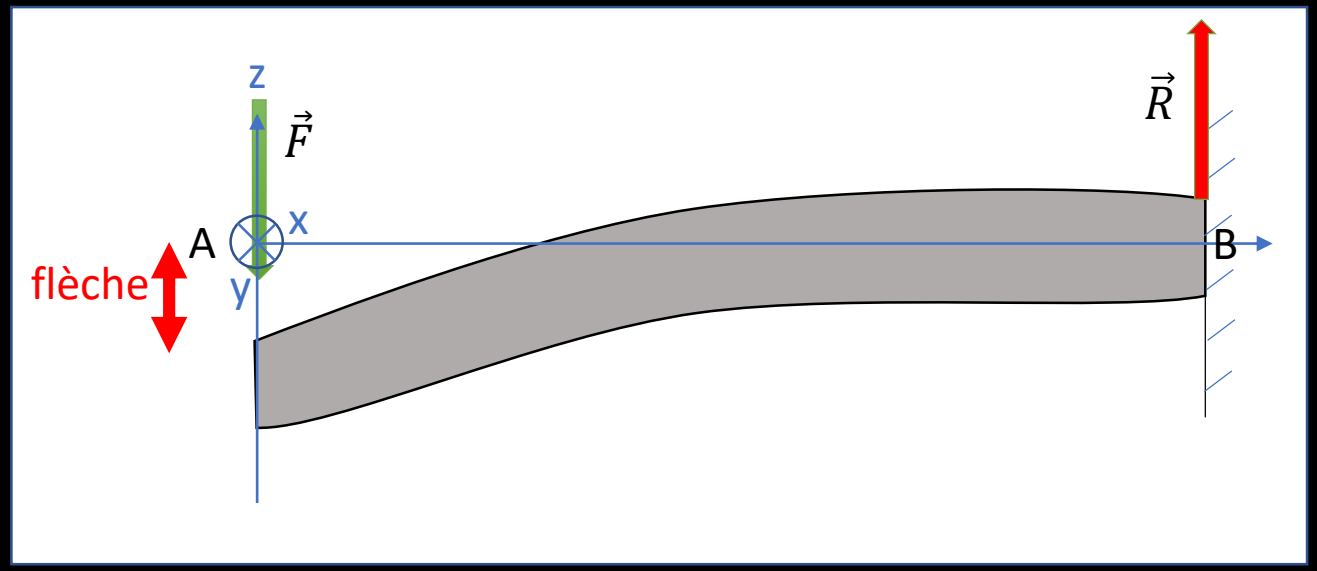
REJETE !

Théorème du moment statique :

$$\vec{M}_A + \vec{M}_B = \vec{O}$$

$$\boxed{M_B = F \cdot L}$$

Etude la flexion simple



Force appliquée en N

Longueur du canon en m

$$flèche = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I}$$

Module de Young du matériau en Pa

Moment quadratique en m^4 = forme géométrique de la section du canon

La résistance des matériaux permet d'aller + loin. On peut calculer la flèche subie par le canon en A.

Hypothèses à satisfaire :

- Petites déformations
- Déformation élastique

} pas vraiment respecter dans le film

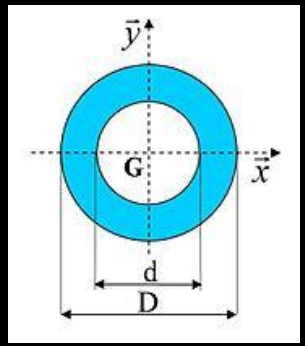
Etude la flexion simple

Objectif : quelle est l'intensité de la force appliquée pour obtenir une flèche de 1 cm ?

Formule :

$$F = \frac{3 \cdot E \cdot I \cdot flèche}{L^3}$$

avec $I = \frac{\pi}{32}(D^4 - d^4)$



Hypothèses :

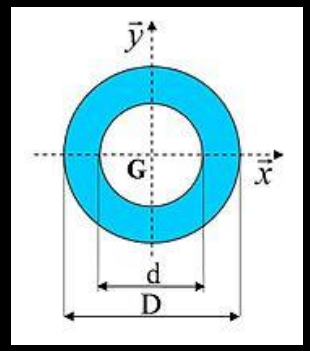
Etude la flexion simple

Objectif : quelle est l'intensité de la force appliquée pour obtenir une flèche de 1 cm ?

Formule :

$$F = \frac{3 \cdot E \cdot I \cdot flèche}{L^3}$$

avec $I = \frac{\pi}{32}(D^4 - d^4)$



Hypothèses :

Hypothèses (suite) :

- L = 6,1 in = 15,49 cm
- D = 1,5 in = 3,81 cm
- d = 9 mm (diamètre des balles)
- E = 250 GPa (acier)

Résultats :

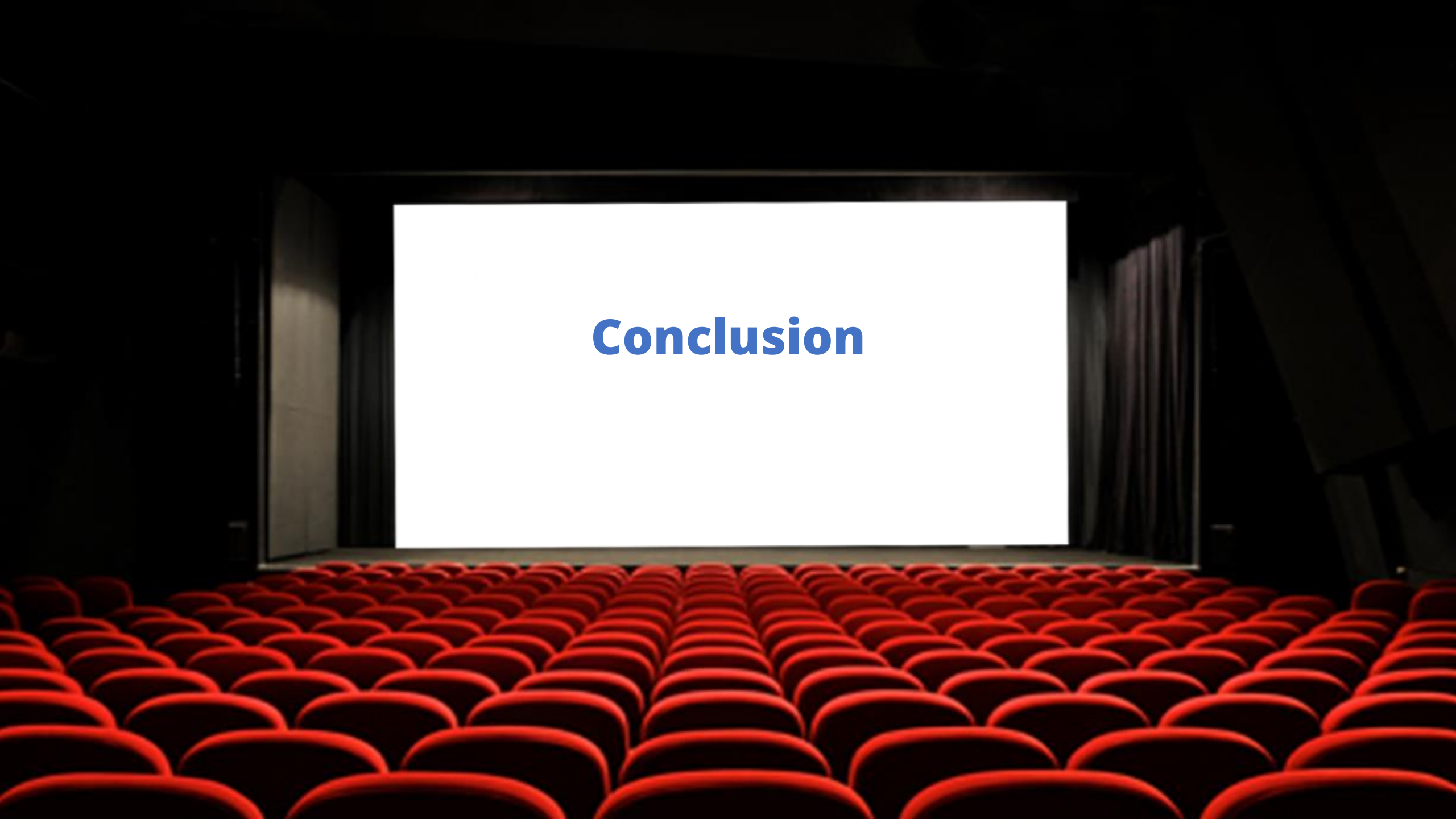
- I = 2,06 cm^4
- F = 416 kN

  équivalent à soulever 42 tonnes

Etude la flexion simple

Petit exercice

Quel est le module de Young du matériau utilisé pour réaliser la scène ?


Conclusion

Conclusion

- Notions de physique étudiées :
  - A l'extérieur du système étudié : une action mécanique = une force et son moment
  - A l'intérieur du système étudié : une contrainte = densité de forces de cohésion (équivalent à une pression)

- Comment les méchants font la démonstration de leur force titanesque ?
  - Levée d'objets encombrants et massifs
  - Déformation plastique de matériau
  - Déformation jusqu'à la rupture de matériau

Tous les types de sollicitations simples sont représentés (traction, compression, cisaillement, flexion simple, ~~torsion~~)

→ Les calculs montrent que la plupart des démonstrations de force sont irréalisables.

- Plusieurs bad guys passés au crible :

May Day

Dr. No

Odd Job

Tee Hee

Requin

Gobinda

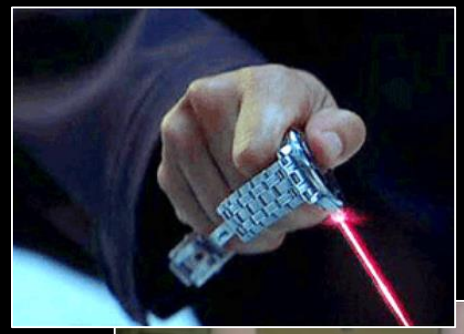
Physique pour Tous !

Saison 4
2021-2022

Cycle
« Physique & Cinéma, édition spéciale 007 »

JAMES BOND ET LE LASER :

UNE LONGUE HISTOIRE D'AMOUR



Mardi 05/10/2021, de 18h15 à 19h45,
amphi Fresnel