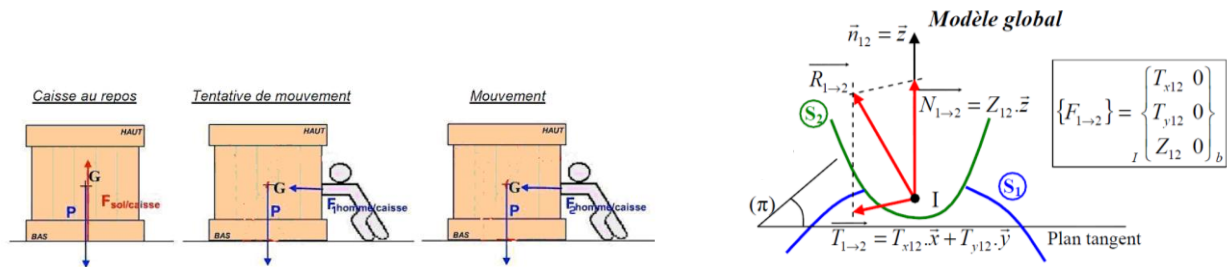


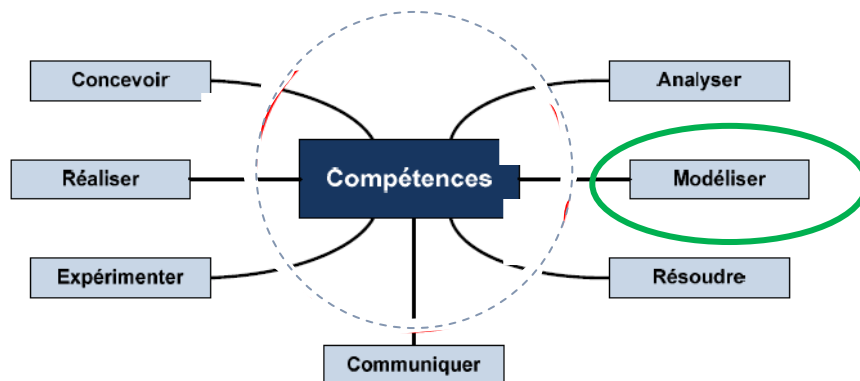
Cycle 6: Modélisation, prévision et vérification du comportement statique des systèmes mécaniques

Chapitre 3 : Actions mécaniques de contact avec frottement Modèle de coulomb



Savoir

- Mod4: Modéliser les frottements secs par les lois de Coulomb
- Mod5: Modéliser la résistance au roulement
- Mod3: Modéliser la résistance au pivotement



Sommaire

1. <u>Généralités</u>	3
2. <u>Frottement et adhérence</u>	3
2.1. Notion de frottement	3
2.2. Coefficient de frottement	4
3. <u>Lois du frottement de glissement - Lois de Coulomb</u>	5
4. <u>Lois du frottement de roulement et pivotement</u>	7
2.1. Frottement et roulement	7
2.2. Frottement, roulement et pivotement	8
5. <u>Notions d'arc-boutement</u>	9



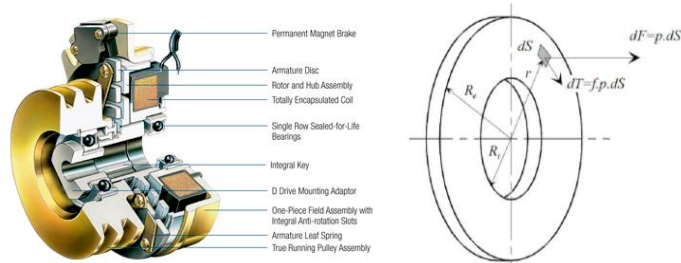
1. Généralités

Jusqu'à présent, nous avons considéré les **liaisons comme parfaites** c'est à dire avec une géométrie parfaite **et sans frottement**.

Les frottements sont généralement **nuisibles dans les mécanismes**. On adopte d'ailleurs des solutions technologiques pour en atténuer les effets tels que la lubrification, le choix des matériaux, la qualité des surfaces, le remplacement éventuel du glissement par du roulement, etc.

Lorsque deux corps sont en contact, le frottement ne peut être évité.

Pour certaines applications, il est même recherché, c'est le cas des liaisons complètes par adhérence (frettage, emmanchement conique, mandrin...), ou des transmissions du mouvement par adhérence (embrayages, roues de friction, courroies, pneus sur route...) et des freins.



Pour d'autres, par contre, on cherche à diminuer le frottement au maximum. C'est le cas dans les mécanismes pour toutes les liaisons assurant le guidage des pièces en mouvement.

Dans tous les cas, il est nécessaire de déterminer le **coefficient de frottement afin d'évaluer les efforts transmis**.

La **formulation de Coulomb** a l'avantage d'être très simple. Mais c'est un modèle parfois assez loin de la réalité. Il prend en compte seulement la nature des matériaux en contact. Des paramètres tels que la pression de contact, la vitesse relative (**frottement fluide**) ou la température peuvent avoir une grande influence sur le coefficient de frottement et doivent être pris en compte.

Retenons néanmoins que dans le cas du **frottement sec, les lois de Coulomb s'appliquent assez bien**.

2. Frottement et adhérence

On dit qu'il y a **frottement lorsqu'il y a déplacement relatif** entre les deux solides en contact.

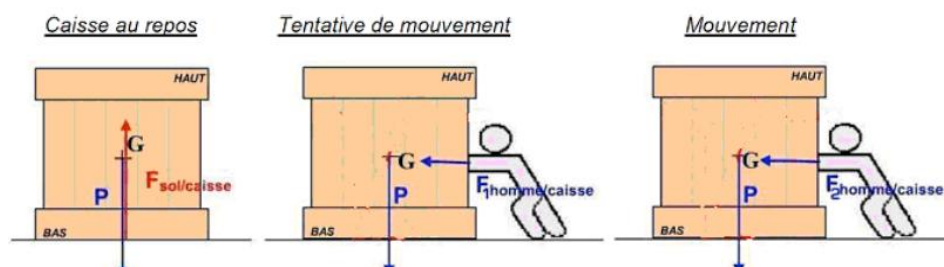
Exemple : disque et garniture de frein, caisse poussée sur le sol, etc.

On dit qu'il y a **adhérence lorsqu'il n'y a pas de déplacement relatif** entre les deux solides en contact.

Exemple : Pièce dans étau, voiture arrêtée dans une pente, etc.

2.1. Notion de frottement

Une caisse de poids P est au repos sur le sol. Un homme souhaite la déplacer simplement en la poussant. Il remarque que la caisse ne se déplace pas si facilement.





Comportement statique des systèmes: Frottement - Modèle de coulomb

- Il y a **adhérence et équilibre dans les 2 premiers cas**. Le phénomène mis en jeu est l'**adhérence**.
- Dans le dernier cas, la **caisse glisse**, il n'y a **plus équilibre**. Le phénomène mis en jeu est le **frottement**.

Le frottement provoque un **effort tangent** ($T_{S/C}$) qui s'oppose au mouvement. Tant que l'action:

- $F_{\text{homme/caisse}}$ est inférieure à cet effort tangent, le déplacement n'est pas possible.
- $F1_{\text{homme/caisse}} < T_{S/C}$: le mouvement n'est pas possible.
- $F2_{\text{homme/caisse}} > T_{S/C}$: le mouvement a lieu.
- $F_{\text{homme/caisse}} = T_{S/C}$: nous sommes à l'équilibre strict.

2.2. Coefficient de frottement

La somme de toutes les micro-actions de contact entre le sol et la caisse se traduit par une résultante $\vec{F}_{\text{sol / caisse}}$ dont les composantes sont :

- Composante normale : $N_{\text{sol/caisse}}$ ($N_{S/C}$)
- Composante tangentielle : $T_{\text{sol/caisse}}$ ($T_{S/C}$)

La résultante fait un **angle ϕ** avec la normale tel que : $\tan \phi = T_{S/C} / N_{S/C}$

On appelle **f le coefficient de frottement tel que $f = \tan \phi$**

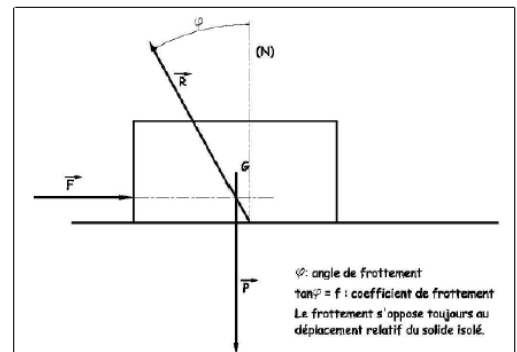
Ce coefficient f a une valeur qui dépend de la nature du contact entre les solides uniquement (matériaux, état, lubrification)

A l'équilibre strict, l'angle ϕ prend une valeur limite correspondant au coefficient de frottement.

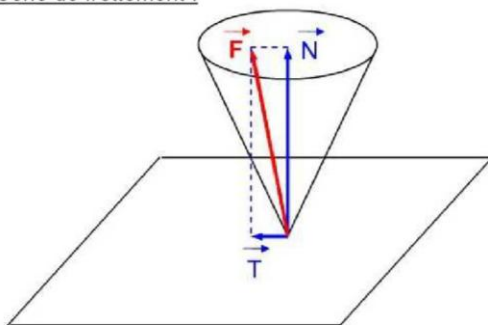
Le solide ci-contre est en équilibre sous l'action de 3 forces qui sont donc :

- coplanaires,
- concourantes en un même point : K
- telles que le dynamique soit fermé

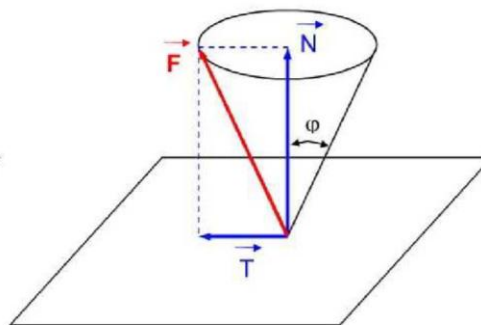
On trouve d'après le PFS (th. résultante en proj sur x) : $F = P \tan \phi$



Cône de frottement :



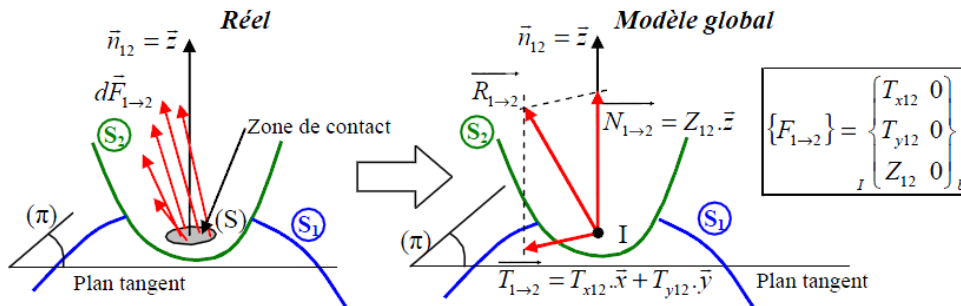
Adhérence et arc-boutement : l'effort F est à l'intérieur du cône.



Frottement strict ou glissement : l'effort F est juste sur le cône.

3. Lois du frottement de glissement - lois de Coulomb

Si le frottement n'est pas négligeable, il existe une composante tangentielle à l'action mécanique.
 (2) / (1): liaison ponctuelle en I de normale (I,z) avec frottement entre les solides S2 et S1.

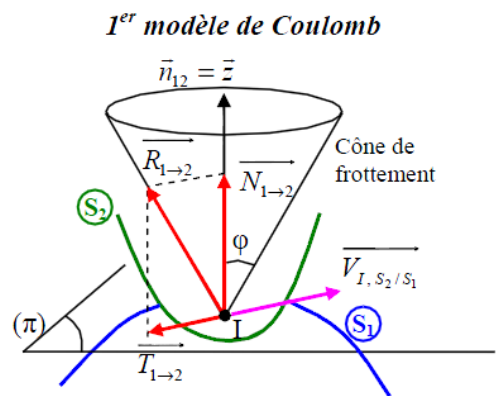


Les lois (expérimentales) de Coulomb permettent de relier les composantes de $\vec{T}_{1 \rightarrow 2}$ à la composante normale Z_{12} . Il existe deux cas de figure.

1^{ère} loi de Coulomb : Glissement en I $\rightarrow \vec{V}_{I, S_2/S_1} \neq \vec{0}$

On définit un coefficient de frottement f tel que $f = \tan \varphi$ où φ est le demi angle au sommet du cône de frottement.

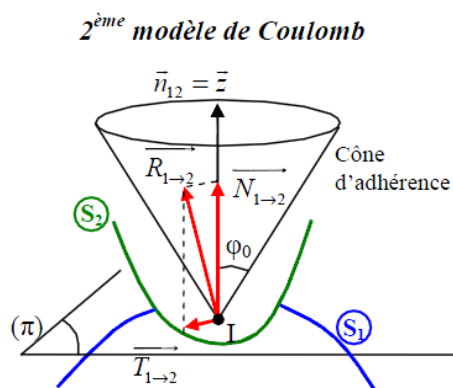
- La composante tangentielle $\vec{T}_{1 \rightarrow 2}$ est opposée à la vitesse de glissement $\vec{V}_{I, S_2/S_1}$.
- $\vec{R}_{1 \rightarrow 2}$ est toujours sur le cône de frottement.
- On connaît exactement $\|\vec{T}_{1 \rightarrow 2}\| : \|\vec{T}_{1 \rightarrow 2}\| = f \|\vec{N}_{1 \rightarrow 2}\|$



2^{ème} loi de Coulomb : Non glissement en I $\rightarrow \vec{V}_{I, S_2/S_1} = \vec{0}$

On définit un coefficient d'adhérence f_0 tel que $f_0 = \tan \varphi_0$ où φ_0 est le demi angle au sommet du cône d'adhérence.

- $\vec{R}_{1 \rightarrow 2}$ est toujours dans le cône d'adhérence.
- On ne connaît pas exactement $\|\vec{T}_{1 \rightarrow 2}\| :$
 $\|\vec{T}_{1 \rightarrow 2}\| \leq f_0 \|\vec{N}_{1 \rightarrow 2}\|$





Comportement statique des systèmes: Frottement - Modèle de coulomb



Attention aux indices pour la 1^{ère} loi de Coulomb.

La composante tangentielle $\vec{T}_{1 \rightarrow 2}$ ($1 \rightarrow 2$) est opposée à la vitesse de glissement $\vec{V}_{I, S_2 / S_1}$ ($2/1$).



Le coefficient de frottement f est en général inférieur au coefficient d'adhérence f_0 ($f_0 \geq f$) mais dans la pratique, les 2 coefficients ayant des valeurs proches, on confond f et f_0 et on utilise uniquement le coefficient de frottement f .



Expérimentalement, on constate que le coefficient de frottement f dépend de la nature de surfaces de contact (matériaux en contact, état de la surface de contact, présence ou non de lubrifiant,...).

En première approximation, on considère que le facteur prépondérant du coefficient de frottement concerne uniquement la nature des matériaux en contact.



Matériaux en contact	Coefficient de frottement
Acier sur acier	De 0,1 à 0,2
Acier sur bronze	De 0,12 à 0,2
Acier sur PTFE	De 0,02 à 0,08
Acier sur garniture de friction	De 0,25 à 0,4
Pneu neuf sur chaussée	De 0,3 à 0,6



Le coefficient de frottement f est un coefficient adimensionnel qui ne dépend pas de l'effort normal appliqué !!!



Pour étudier l'équilibre d'un solide lorsque celui-ci adhère (non glissement en I), on peut se placer à la limite du glissement (c'est-à-dire dans l'hypothèse limite où le solide commence à glisser). Il n'y a donc pas encore de mouvement relatif mais on peut appliquer la première loi de Coulomb.

Se placer à la limite du glissement revient donc à considérer que $\vec{R}_{1 \rightarrow 2}$ est sur le cône de frottement.

Valeurs usuelles des facteurs de frottement et d'adhérence

Matériaux en contact	$f' = \tan \varphi'$ (adhérence)		$f = \tan \varphi$ (frottement)	
	sec	lubrifié	sec	lubrifié
Acier cimenté trempé sur acier cimenté trempé	0,2 à 0,3	0,15 à 0,2	0,2	0,12
Acier cimenté trempé sur fonte trempée	0,2	0,12 à 0,2	0,15	0,08
Acier cimenté trempé sur bronze trempé	0,2	0,15 à 0,20	0,25	0,12
Acier inoxydable chromé sur aluminium			0,4	0,1
Acier sur cuivre étamé			0,12	0,09
Acier sur métal fritté		0,1 à 0,18	0,1 à 0,12	0,03 à 0,06
Acier sur "férodo"	0,3 à 0,4		0,25 à 0,35	
Acier sur graphite		0,1		0,09
Acier graphité sur téflon			0,1	0,08
Acier sur palier PTFE	0,08 à 0,04		0,02 à 0,08	0,003 à 0,05
Acier sur polyéthylène			0,3 à 0,8	
Pneu neuf sur route	1		0,5 à 0,6	0,3 à 0,5

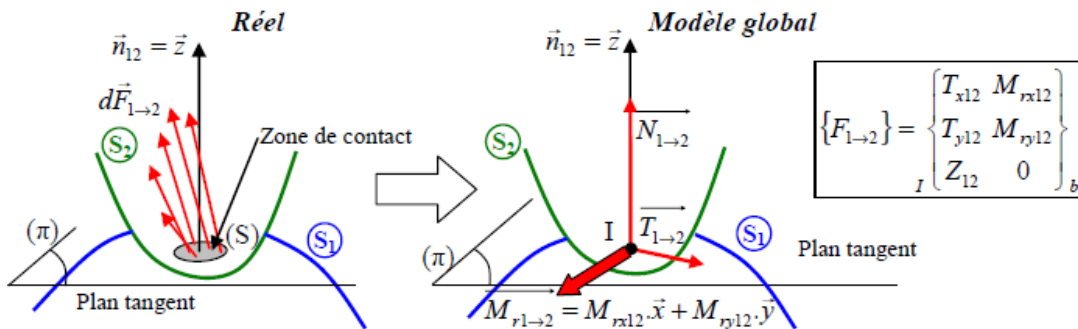


4. Lois du frottement de roulement et de pivotement

4.1. Frottement et roulement

Si le roulement n'est pas négligeable, il existe 2 composantes de moment dans le plan tangent.

(2) / (1): liaison ponctuelle en I de normale (I,z) avec frottement et roulement entre les solides S2 et S1.

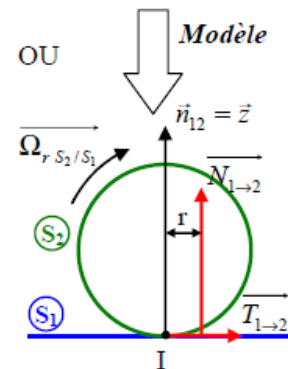
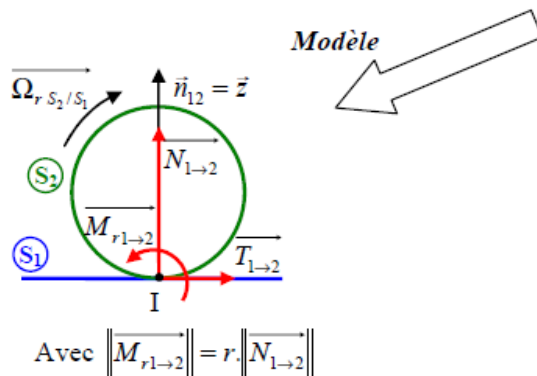
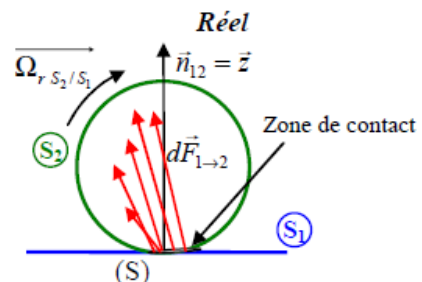


Des lois (expérimentales) permettent de relier les composantes de \vec{M}_{r1-2} à la composante normale Z_{12} de l'action mécanique.

Roulement en I : $\vec{\Omega}_{r S_2/S_1} \neq \vec{0}$

On définit un coefficient de résistance au roulement r.

- $\|\vec{M}_{r1-2}\| = r \cdot \|\vec{N}_{1-2}\|$
- \vec{M}_{r1-2} s'oppose à $\vec{\Omega}_{r S_2/S_1}$.



Le frottement de roulement est dû à la déformation des surfaces en contact. Expérimentalement, on constate que le coefficient de résistance au roulement r **dépend de la nature de surfaces de contact** (matériaux en contact, état de la surface de contact, présence ou non de lubrifiant,...).

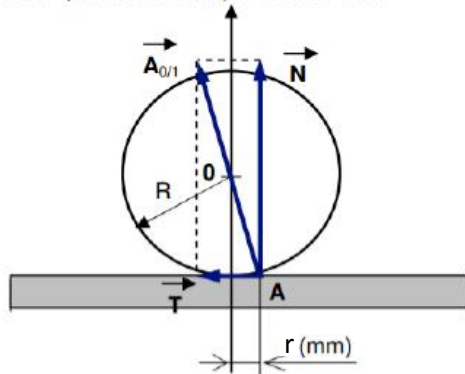


Le coefficient de résistance au roulement r est homogène à une longueur !!!

Comportement statique des systèmes: Frottement - Modèle de coulomb

Lors du roulement, l'élément roulant déforme la surface sur laquelle il roule. L'action de contact prend donc l'orientation que montre la figure.

Le coefficient de roulement est donné par une distance r entre la position théorique et réelle du point de contact A.



La résistance au roulement est la

composante tangentielle de l'action de contact $A_{0/1}$

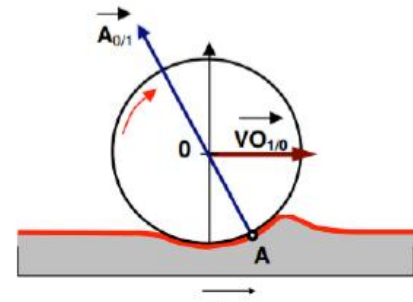
En admettant r très faible, on peut écrire $OA = R$. Donc :

Résistance au roulement :

$$T = \frac{r N}{R}$$

Exemples:

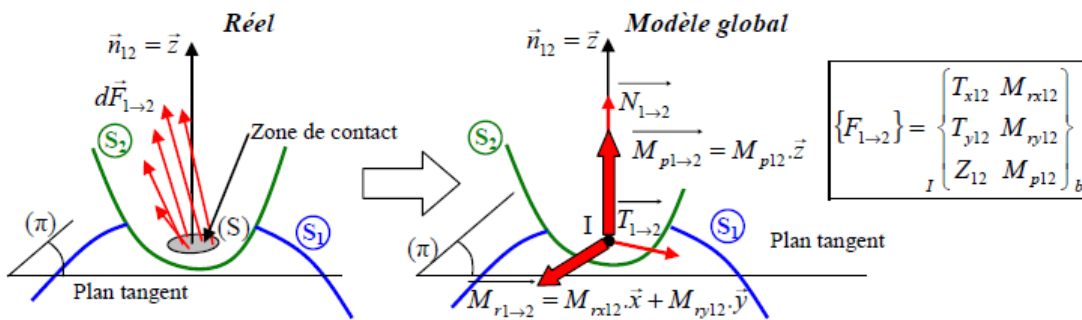
Matériaux en contact	r (mm)
Acier /acier	0,5 à $1 \cdot 10^{-3}$
Pneu /chaussée	0,5 à 2



4.2. Frottement, roulement et pivotement

Si le pivotement n'est pas négligeable, il existe 1 composante de moment normale plan tangent

(2) / (1): liaison ponctuelle en I de normale (I,z) avec frottement, roulement et pivotement entre les solides S2 et S1.

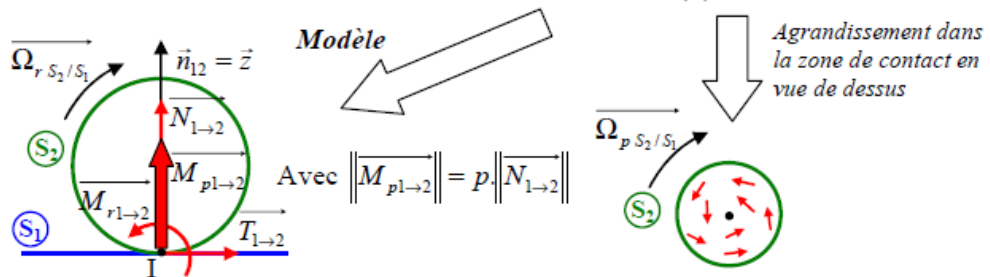


Des lois (expérimentales) permettent de relier la composante de \vec{M}_{p1-2} à la composante normale Z_{12} de l'action mécanique.

Pivotement en I : $\vec{\Omega}_{p S_2/S_1} \neq \vec{0}$

On définit un coefficient de résistance au pivotement p.

- $\|\vec{M}_{p1 \rightarrow 2}\| = p \cdot \|\vec{N}_{1 \rightarrow 2}\|$
- $\vec{M}_{p1 \rightarrow 2}$ s'oppose à $\vec{\Omega}_{p S_2/S_1}$.



Le frottement de roulement est dû à la déformation des surfaces en contact. Expérimentalement, on constate que le coefficient de résistance au pivotement p **dépend de la nature de surfaces de contact** (matériaux en contact, état de la surface de contact, présence ou non de lubrifiant,...).



Le coefficient de résistance au pivotement p est homogène à une longueur !!!

4. Notions d'arc-boutement

L'arc-boutement est un comportement dû à l'adhérence entre solides. Lorsque toutes les actions de contact agissant sur un solide sont situées dans le cône d'adhérence, il ne peut y avoir de glissement, on parle alors **de coincement ou d'arc-boutement**.

Dans certains cas, ce phénomène est recherché (serre-joints, roue libre, pistolet à colle, ...) et dans d'autres, il doit être évité (liaison glissière « tiroir de bureau », ...).

Deux solides en contact sont dits arc-boutés l'un sur l'autre, sous l'effet d'actions mécaniques, ! si les deux solides restent immobiles l'un par rapport à l'autre, ! quelle que soit l'intensité de ces actions mécaniques.

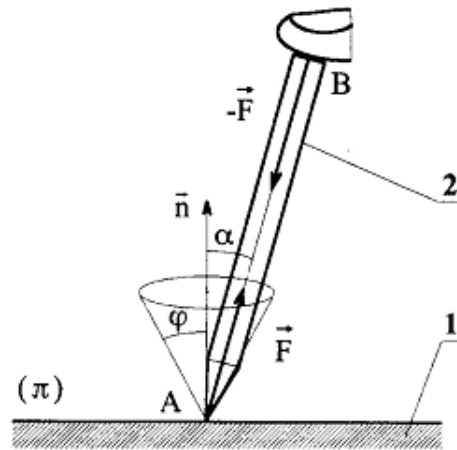
Dans l'hypothèse du solide indéformable, la condition d'arc-boutement est une **condition géométrique**.

Exemple d'un crayon contre une table :

Un crayon 2 est appuyé contre le plan (π) d'une table 1 par le doigt d'une main.

Si on néglige son poids, le crayon est en équilibre sous l'action de deux glisseurs opposés de droite d'action (AB).

Si l'inclinaison α de l'axe du crayon reste inférieure à l'angle d'adhérence limite φ , entre la mine et la table, alors la mine du crayon ne glissera pas sur la table, **quelle que soit l'intensité \vec{F}** de l'action exercée par le doigt.



Exemple d'une échelle contre un mur

Une échelle 2, de centre de gravité G et de poids \vec{P} , repose sur le sol 1 au point A et appuie contre le mur 3 au point B.

On suppose le contact en B sans frottement et en A avec frottement.

L'échelle est en équilibre sous l'action de trois glisseurs.

- en A : glisseur inconnu ,
- en B : glisseur de droite d'action normale au plan tangent $\vec{R}_{1 \rightarrow 2}$,
- en G : poids connu \vec{P} .

$\vec{R}_{1 \rightarrow 2}$ et \vec{P} étant concourants au point I,

$\vec{R}_{1 \rightarrow 2}$ a pour droite d'action (AI).

Si l'inclinaison α de ce glisseur par rapport à la verticale reste inférieure à l'angle d'adhérence limite φ , l'échelle reste en équilibre **quelque soit son poids**.

