

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Méthode de travail</b>	<b>4</b>
1.1	Les objectifs . . . . .	4
1.2	La pédagogie utilisée . . . . .	4
1.3	L'évaluation des compétences . . . . .	6
1.4	Plan de progression dans cet enseignement . . . . .	8
1.4.1	Les compétences de physique de l'ingénieur . . . . .	8
1.4.2	J'ai lu les pages : . . . . .	8
1.4.3	J'ai obtenu les brevets . . . . .	8
1.4.4	Je suis référent des brevets : . . . . .	9
1.4.5	Lors de cette séance... . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Physique fondamentaux</b>	<b>10</b>
2.1	Unités et dimensions (1 séances) . . . . .	10
2.1.1	Objectifs . . . . .	10
2.1.2	Homogénéité, adimensionalisation . . . . .	10
2.1.3	Adimensionalisation . . . . .	11
2.1.4	Unités logarithmiques relatives ou absolues . . . . .	11
2.1.5	Ordres de grandeurs . . . . .	11
2.1.6	Brevets d'acquisition de connaissance . . . . .	11
2.1.7	Brevets de vérification de connaissance . . . . .	12
2.2	Grandeurs en Mécanique (2 séances) . . . . .	13
2.2.1	Objectifs . . . . .	13
2.2.2	Force et couple . . . . .	13
2.2.3	Principe d'action - réaction . . . . .	13
2.2.4	Moment d'une force . . . . .	14
2.2.5	Brevets d'acquisition de connaissance . . . . .	15
2.2.6	Une action fictive : la "force" d'inertie et le "moment" d'inertie . . . . .	16
2.2.7	Puissance, travail d'une force, et les forces qui ne travaillent pas ? . . . . .	16
2.2.8	Brevets d'acquisition de connaissance . . . . .	17
2.2.9	Forces à distance . . . . .	17
2.2.10	Brevets d'acquisition de connaissance . . . . .	19
2.2.11	Forces de contact et forces internes . . . . .	19
2.2.12	Brevets d'acquisition de connaissance . . . . .	21
2.3	Instrumentation (1 séance) . . . . .	22
2.3.1	Objectifs . . . . .	22
2.3.2	Pied à coulisse, vernier angulaire, butée micrométrique. . . . .	22
2.3.3	Usage d'un générateur de fonctions . . . . .	22
2.3.4	Usage d'un multimètre . . . . .	23
2.3.5	Usage d'un oscilloscope. Modes AC/DC. Zéro et masse. Réglages pour un usage à pleine échelle/plein cadran. . . . .	23
2.3.6	Brevet d'acquisition de connaissance . . . . .	23

2.3.7	Brevet de vérification de connaissance . . . . .	23
2.4	Représenter des mesures (1 séances) . . . . .	24
2.4.1	Objectifs . . . . .	24
2.4.2	Echantillonner intelligemment une série de mesures . . . . .	24
2.4.3	Présenter des mesures : Chiffres significatifs ; tableaux ; graphes . . . . .	24
2.4.4	Brevet d'acquisition de connaissance . . . . .	25
2.4.5	Brevet de vérification de connaissance . . . . .	25

Si vous êtes l'une des 300 personnes qui téléchargent annuellement ce polycopié et que vous passez au Mans, venez m'offrir un café (sans sucre)... et on en profitera pour parler du contenu afin de l'améliorer.

Jean-Michel

# Chapitre 1

## Méthode de travail

### 1.1 Les objectifs

Cet enseignement sera dispensé pendant les séances de CRAIES ("Coopérons à notre Rythme d'Apprentissage Individualisé Efficace et Sympathique"). Lorsque plusieurs enseignements sont proposés pendant les séances de CRAIES, vous choisissez à quelle séance vous vous rendez. Pour que vous puissiez organiser vos apprentissages, pour chacun des enseignements, un plan de travail personnel et pour l'année résume :

- les étapes de formation (brevets),
- les objectifs de formation (ceintures ou examen).
- le nombre de séances à priori qu'il vous faut suivre,

Les objectifs de formation de ce cours s'insèrent dans les objectifs de formation de l'Ensim. Les liens entre une partie de ceux-ci sont représentés dans la figure 1.1.

### 1.2 La pédagogie utilisée

Pour les séances animées par Jean-Michel Gènevaux

Les séquences d'enseignement en présentiel (CRAIES) sont divisées en quatre parties :

- Lors de votre entrée dans la salle, vous prenez un plot de couleur et vous y insérez le triaide et éventuellement le drapeau du brevet dont vous êtes référent. Vous posez en évidence sur la table votre plot.
- Lecture silencieuse du photocopié pendant 10 minutes. Vous cochez les lieux où vous avez une difficulté, au besoin notez votre question. Durant cette phase, vous ne cherchez pas d'aide auprès de vos collègues.
- Lors d'un second temps, il est demandé à chacun s'il a une question. La question est posée à haute voix, l'enseignant répond à tous. Ce module étant ouvert gratuitement sur le net, nous souhaitons enregistrer en vidéo les phases de questions-réponses qui seront ensuite indexées dans le photocopié aux lieux adéquats, ce qui permettra de les consulter en différé. Cela permettra aux personnes suivant ce cours à distance, de consulter les FAQ (frequently asked questions). Si vous ne souhaitez pas apparaître à l'écran, par respect pour votre droit à l'image ou pour cause mise de en plis défectueuse ce matin là car vous aviez tellement travaillé hier soir, seule votre voix peut être enregistrée en ne vous placent pas dans le cadre de la webcam. La prise d'image est assurée par un étudiant-caméraman. Un autre étudiant veille à ce que l'enseignant répète la question et lui fait signe s'il oublie de le faire, puis vérifie dans les faq que cette question n'a pas déjà été enregistrée. Si oui, il fait signe à l'étudiant-caméraman qu'il peut arrêter la prise d'image. L'enseignant continue de répondre à la question posée.
- Une phase d'exercices (brevets) est alors faite, à votre rythme. La banque de brevet regroupe l'ensemble des exercices (<https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00611694>). Ils ont été écrits suite

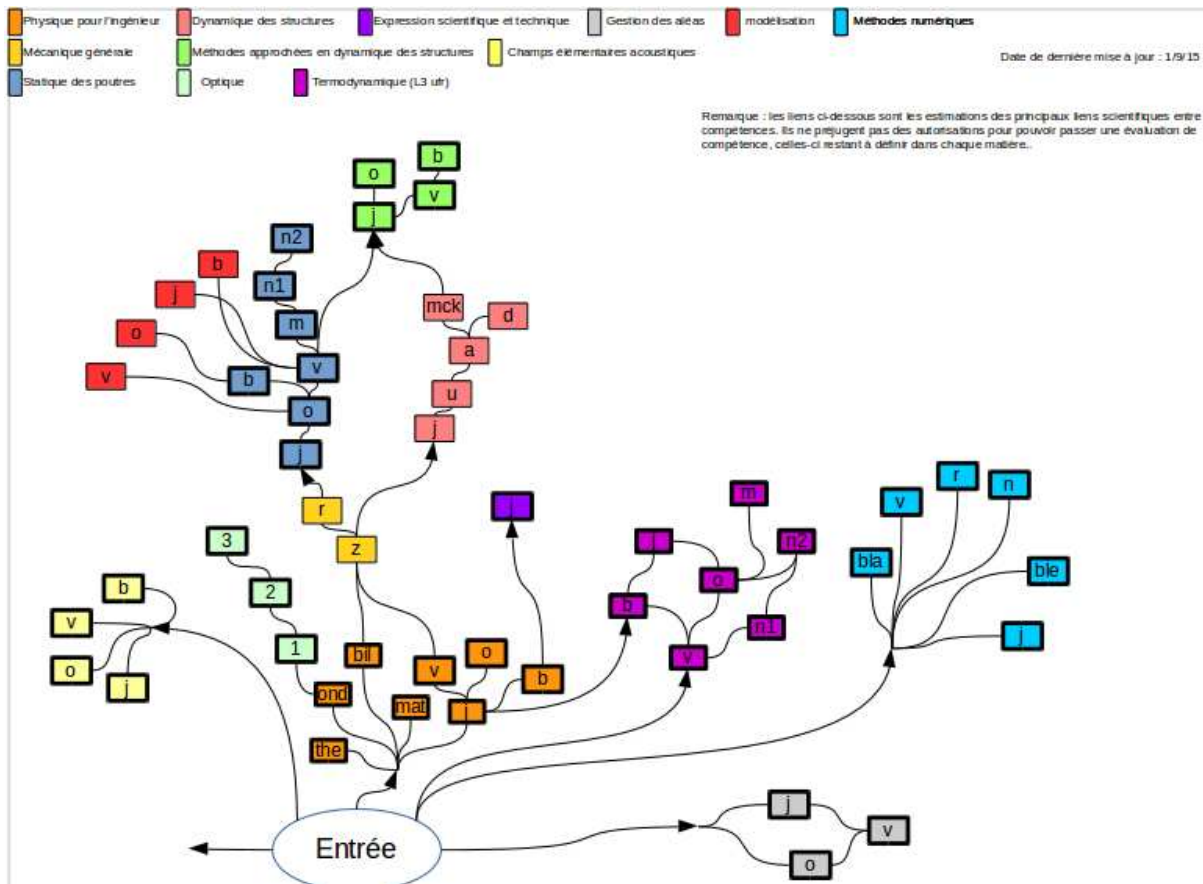


FIGURE 1.1 – Chaînage des compétences pour quelques enseignements à l'Ensim.

aux erreurs rencontrées les plus fréquemment dans les copies d'examen. Cette banque de brevets concerne l'ensemble des trois années de formation à l'ENSIM. Un arbre des connaissances vous permet, en grisant les brevets dont vous êtes détenteur-trice de savoir où vous en êtes dans la formation proposée. Pour un brevet que vous avez bien compris, vous pouvez en devenir le référent : votre rôle est alors d'aider les autres à l'obtenir. Un système de drapeau, que vous posez sur votre table lors des séances suivantes, permet aux étudiants de vous identifier et de venir chercher de l'aide. Vous n'êtes pas obligé de répondre instantanément à la demande d'aide : finissez ce que vous êtes en train de faire. Néanmoins, bien que le demandeur d'aide puisse commencer un autre brevet en vous attendant, ne le laissez pas mariner pendant 1/2 h. L'aide de l'enseignant se concentre sur les brevets pour lesquels il n'y a pas encore de référent. Afin que chacun puisse se concentrer sur son travail, si vous échangez avec vos voisins, merci de le faire en chuchotant.

- Les deux dernières minutes d'une séquence sont utilisées pour noter votre progression sur le plan de travail et de prendre un peu de recul sur votre activité pendant cette séance.

### 1.3 L'évaluation des compétences

L'évaluation est faite par la validation de compétences. Le chaînage des compétences testées est indiqué en début du polycopié. Une compétence est acquise lorsque

- vous trouvez le(s) résultat(s),
- votre réponse à cette compétence ne présente pas d'erreur d'homogénéité,
- votre réponse à cette compétence utilise des écritures complètes (vecteurs, bases, points d'expression d'un torseur, unités pour un résultat chiffré).

Insistons : une compétence n'est pas acquise si la démarche est juste, mais le résultat faux (erreur de calcul lors de cette compétence, ou lors des compétences parentes).

La validation des compétences est faite par des bretelles et peut être complétée par la réussite à des item d'un examen.

La note est fournie par la réussite d'items à l'examen.

Ne disposant que de 40 minutes pour les compétences associées à l'enseignement dispensé par JM Génevaux, toutes ne seront pas testées lors de l'examen. Vous pouvez néanmoins les valider en passant des *bretelles* qui ne comptent pas dans la note. Vous pouvez tenter d'obtenir une bretelle lorsque vous sentez prêt-e à le faire. Vous ne pouvez tenter qu'une bretelle à la fois. Vous pouvez tenter une bretelle au maximum 3 fois. Si au bout de 3 tentatives, vous ne la détenez pas, vous pouvez tenter la bretelle  $n + 1$  suivante (3 fois). L'obtention de la bretelle de niveau  $n + 1$  vous attribue alors les bretelles de niveaux  $n + 1$  et  $n$ .

Le passage d'une bretelle peut se faire jusqu'à 10 jours avant le dernier jury de 5<sup>ième</sup> année.

- Vous téléchargez le sujet sur UMTICE
- Sur votre copie (fournie), à côté de la déclaration suivante : *"Je m'engage sur l'honneur à n'évoquer avec personne le contenu du sujet de passage de cette bretelle. Cependant, dans le cas où je ne réussirais pas à l'obtenir, j'ai compris pouvoir discuter de mon travail avec les étudiants ayant acquis cette bretelle. Si l'enseignant a la preuve que je n'ai pas respecté mon engagement (j'ai admis le non-respect, je suis incapable de refaire la ceinture en mode surveillé...), un rapport de fraude est fait par l'enseignant et transmis au directeur de l'école ou au directeur de l'UFR qui transmet à la commission de discipline de l'université. L'enseignant y demandera que je ne puisse plus passer de bretelles et ceintures en autonomie dans la matière concernée pour l'année universitaire en cours."*, vous écrivez "lu et approuvé" et vous signez. Cela permet à vos camarades de faire une mesure "libre et non faussée" de leurs savoirs scientifiques et non de leur compétence de mémorisation... ou de (risquée) recopie.
- Vous répondez au sujet en respectant votre engagement. Ceci peut être fait chez vous, dans une autre salle, informatique si nécessaire, au moment qui vous convient.

- Vous apportez votre sujet, copie et brouillon, le tout agrafé, à l'enseignant de la matière concernée pendant une séance d'enseignement du responsable de cette ceinture, que ce soit dans cette matière ou dans une autre, à l'Ensim ou à l'UFR Sciences. Pour trouver les heures et salles où le trouver, consultez ADSOFT filtre "genevaux".
- L'enseignant décide alors soit de vous poser une question sur au moins un des items de votre copie et brouillon pour estimer si vous en êtes l'auteur, soit ne pas vous demander de justification.

Etre détenteur d'une bretelle implique qu'en tant qu'expert de celle-ci vous aidiez vos camarades à l'obtenir : en les orientant sur les brevets afférents, en répondant à leurs questions sur ces brevets, en insistant sur des points qui vous ont éventuellement fait rater la ceinture dans des tentatives précédentes, en inventant des exercices similaires, sans dévoiler le contenu du sujet de la bretelle ni les réponses.

Une cartographie des compétences que vous avez validées une fois, un jour, vous sera fournie, et sera mise à disposition des enseignants de l'ensim dont ces compétences représentent des prérequis pour de l'enseignement qu'ils vous délivreront. Si un enseignant de votre scolarité à venir, constate que vous avez oublié cette compétence, je suis à votre disposition pour vous la faire retravailler et vous proposer de la ré-activer par le passage d'une nouvelle tentative de bretelle.

L'interfaçage avec les modalités de contrôle des connaissances nécessite, hélas, une note... (Relire l'invariant pédagogique 19 de Célestin Freinet [?]). Le sujet d'examen comportera des items similaires aux sujets de bretelles. Insistons : si vous validez une compétence par une bretelle en autonomie, et échouez à la validation de cette compétence lors de l'examen,

- la détention de la bretelle ne permet pas d'avoir les points associés à cet item à l'examen,
- ne vous enlève pas la compétence dans le graphe,
- vous indique que cette compétence avait été validée en bretelle par chance : retravaillez-là!

Nous vous souhaitons une bonne découverte, une intéressante confrontation des modèles que nous développerons lors de cette formation à la réalité des essais effectués en travaux pratiques, et bien sûr... une bonne coopération entre vous, sauf pour le passage des bretelles..

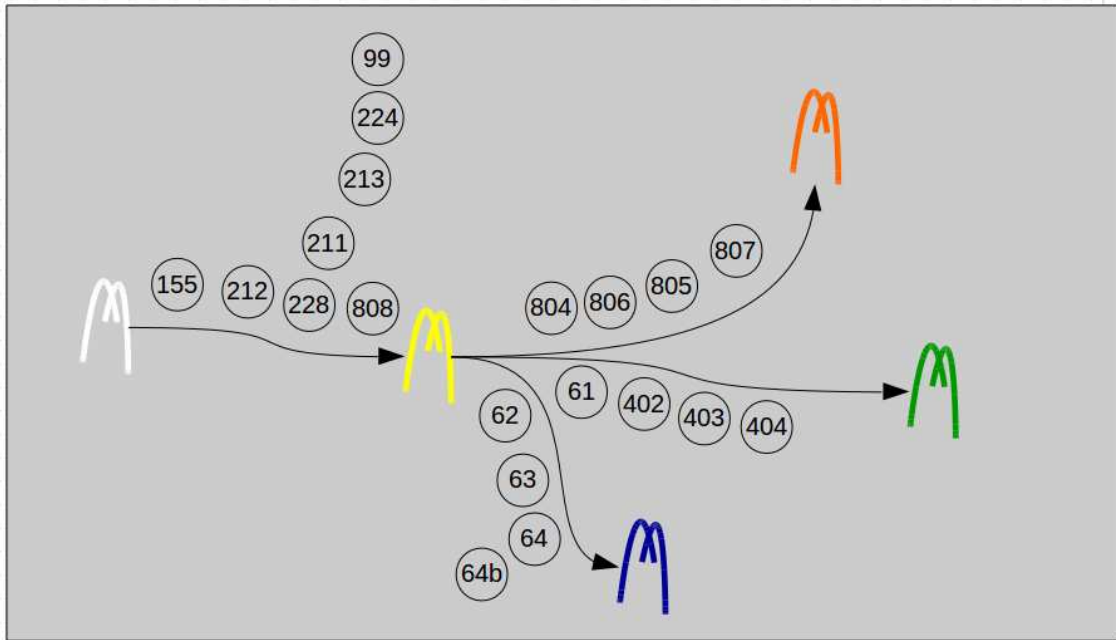


FIGURE 1.2 – Progressions des brevets et ceintures.

## 1.4 Plan de progression dans cet enseignement

Pour que vous veilliez à ne pas prendre du retard dans votre progression, veuillez compléter au fur et à mesure des séances les brevets obtenus (figure 1.2), les pages lues, les numéros de brevets dont vous êtes référent et les impressions sur chaque séance.

### 1.4.1 Les compétences de physique de l'ingénieur

1. blanche : être venu une fois en cours pour récupérer le polycopié.
2. jaune : savoir déterminer si une équation est homogène ou la dimension d'une variable à partir de l'homogénéité.
3. orange : savoir distinguer et calculer en mécanique les notions de force, de moment, de puissance
4. verte : savoir faire une mesure avec un outil (pied à coulisse, oscilloscope)
5. bleue : savoir présenter des résultats de mesure.

### 1.4.2 J'ai lu les pages :

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24

### 1.4.3 J'ai obtenu les brevets

Complétez la figure 1.2.



#### 1.4.4 Je suis référent des brevets :

#### 1.4.5 Lors de cette séance...

Compléter \* avec "content", "énervé", "déçu", "inquiet", "fatigué", "satisfait", "soulagé", ...

— Aujourd'hui, je me sens \* ...

du travail que j'ai effectué durant le cours, car ...

— Aujourd'hui, je me sens \* ...

du travail que j'ai effectué durant le cours, car ...

— Aujourd'hui, je me sens \* ...

du travail que j'ai effectué durant le cours, car ...

— Aujourd'hui, je me sens \* ...

du travail que j'ai effectué durant le cours, car ...

— Aujourd'hui, je me sens \* ...

du travail que j'ai effectué durant le cours, car ...

# Chapitre 2

## Physique fondamentaux

### 2.1 Unités et dimensions (1 séances)

#### 2.1.1 Objectifs

- Homogénéité d'une relation
- Equation aux dimensions
- Unités adimensionnelles.  
Unités angulaires : radian = unité physique. minutes et secondes d'arc.
- Unités logarithmiques relatives ou absolues, dimensionnées ou adimensionnées : dB, dBm, dBm - dBm = dB, dB/km, pH, octave, magnitude et niveau (visuelle, sismique), etc ...
- Ordres de grandeurs, échelles : de taille ; de masse ; de temps ; de puissance acoustique ; de puissance lumineuse ; débit d'informations...
- Conversions des principales unités entre système métrique et système impérial

#### 2.1.2 Homogénéité, adimensionalisation

Les grandeurs de part et d'autre d'une équation sont généralement de natures différentes. Par exemple, le principe fondamental de la dynamique en terme de résultante

$$\vec{F} = m\vec{\Gamma}_{G,S/R_0}, \quad (2.1)$$

exprime une relation entre un effort  $F$ , une masse  $m$  et l'accélération du centre de gravité d'un solide  $\Gamma$  (voir cours de "Mécanique Générale"). Cette écriture est intrinsèque : elle ne dépend pas du repère dans lequel les grandeurs sont exprimées (repère cartésien, cylindrique, sphérique, curviligne...). Vous devez vérifier pour chaque loi, que l'équation est homogène : que les dimensions sont les mêmes de part et d'autre d'un signe égalité. Dans l'exemple précédent, l'équation est homogène à une masse fois une longueur divisée par un temps au carré :

$$MLT^{-2}. \quad (2.2)$$

Les équations sont donc indépendantes de l'unité prise pour chaque grandeur (pour la longueur  $L$  : le mètre, le centimètre, le pouce...). Il suffit de choisir les mêmes unités de part et d'autre de l'équation. Lorsque vous sumez deux termes, ils doivent aussi être homogènes. Ajouter une carotte et un chou ne fera pas deux quelque chose, mais juste un début de pot-au-feu. Essayez d'additionner des km/h et des kg pour vous en convaincre. La norme internationale ISO 1000 (ICS 01 060) décrit les unités du Système International et les recommandations pour l'emploi de leurs multiples et de certaines autres unités. Le Système International compte sept unités de base : le mètre, le kilogramme, la seconde, l'ampère, le kelvin, la mole et la candela, censées quantifier des grandeurs physiques indépendantes.

Lorsqu'une grandeur est définie par une dérivée, une dérivée partielle ou une intégrale, l'équation aux dimensions est construite comme si les dérivées correspondaient à une division et l'intégrale à une multiplication. Par exemple,

- si  $f(s) = \frac{dg(s)}{ds}$  avec  $g(s)$  en m et  $s$  en kg, alors  $f(s)$  s'exprime en m/kg,
- si  $k(t_1) = \int_{t_0}^{t_1} g(t)dt$  avec  $g(t)$  en V et  $t$  en s, alors  $k(t_1)$  s'exprime en V.s.

### 2.1.3 Adimensionalisation

Des grandeurs sont sans dimension. Vous n'ignorez pas que le périmètre d'un cercle de rayon  $r$  est  $p = 2\pi r$ . Si on ne décrit qu'une partie du cercle une relation similaire lie la longueur de l'arc de cercle  $c$  au rayon :  $c = \alpha r$ . L'angle est donc  $\alpha = c/r$  un rapport de deux longueurs : l'angle, exprimé en radian est sans dimension. De même, l'écoulement d'un fluide visqueux dépend du rapport entre les effets dynamiques et les effets visqueux. Lorsque l'on souhaite faire une maquette à échelle réduite, il faut conserver ce rapport entre les différentes forces : on conservera le nombre de Reynolds  $Re = \frac{vd}{\nu} = \frac{\rho vd}{\eta}$ , avec  $d$  une dimension caractéristique de l'écoulement,  $v$  une vitesse caractéristique de l'écoulement,  $\nu$  la viscosité cinématique,  $\rho$  la masse volumique et  $\eta$  la viscosité dynamique. L'adimensionalisation des équations est très utilisée en mécanique des fluides, hélas beaucoup moins en mécanique des solides. Ceci n'est en fait dû qu'à des habitudes différentes au sein des deux communautés. Adimensionaliser les équations a l'avantage de faire apparaître les groupements adimensionnels de paramètres qui régissent le comportement, mais présente l'inconvénient, en cas d'erreur de calcul par une omission d'un terme adimensionnel, de laisser l'équation homogène (ce ne sont que des multiplications/additions/divisions de nombres sans dimension), et donc enlève un moyen de vérifier le résultat final.

### 2.1.4 Unités logarithmiques relatives ou absolues

Des capteurs, comme nos oreilles par exemple, ne sont pas sensibles de façon linéaire au signal reçu, pour nos oreilles, au bruit. Il est donc intéressant de ne pas mesurer le niveau acoustique sur une échelle linéaire, mais logarithmique. De plus, prendre en compte le seuil d'audibilité pour définir l'échelle logarithmique amène à considérer un niveau de référence de pression de  $P_{ref} = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa. On construit alors  $L_p = 10 \log \left( \frac{p_{eff}^2}{p_{ref}^2} \right) = 20 \log \left( \frac{p_{eff}}{p_{ref}} \right)$  dont l'unité est alors le décibel noté dB, avec  $p_{eff}$  la pression efficace en Pa. Le choix d'une échelle logarithmique dans la représentation graphique d'une relation entre deux grandeurs  $a$  et  $b$  peut être justifiée par :

- des répartitions des valeurs de  $a$  ou  $b$  de façon géométrique
- pour déterminer des coefficients lorsque la fonction liant  $a$  et  $b$  est non linéaire.

Prenons par exemple une relation théorique du type  $b = a^{0.34}$ . Si l'on cherche à vérifier expérimentalement l'exposant de cette relation, il est plus judicieux de tracer  $\log b$  en fonction de  $\log a$  : la fonction théorique ( $\log b = 0.34 \log a$ ) est une droite passant par l'origine, les points expérimentaux permettent de leur côté de déterminer la pente expérimentale (avec son incertitude) qui donne la valeur expérimentale du coefficient (avec son incertitude).

### 2.1.5 Ordres de grandeurs

Il ne suffit pas que votre mesure soit donnée dans des unités cohérentes, par exemple si votre capteur mesure la vitesse du cycliste en descente par la rupture de deux faisceaux lasers distants de 1 cm dans un intervalle de temps de  $12.3 \cdot 10^{-2}$  s, encore faut-il que la valeur soit réaliste. Dans le cas de votre cycliste, il roule à 0.29 km/h ! On compte sur votre expérience.

### 2.1.6 Brevets d'acquisition de connaissance

Pour vérifier que vous avez assimilé ce paragraphe, je vous invite à obtenir le brevet 155, 212, 228 et 808.

Si vous avez des difficultés, je vous invite à contacter le référent du brevet correspondant, dont le mél est disponible sur <http://umtice.univ-lemans.fr/course/view.php?id=403>.

### **2.1.7 Brevets de vérification de connaissance**

Pour vérifier que vous savez réinvestir cette connaissance sur un autre cas, je vous invite à obtenir les brevets 211, 213, 224 et 099. Si vous avez des difficultés, je vous invite à contacter le référent du brevet correspondant, dont le mél est disponible sur <http://umtice.univ-lemans.fr/course/view.php?id=403>.

## 2.2 Grandeurs en Mécanique (2 séances)

### 2.2.1 Objectifs

- distinguer les concept de force, moment, puissance, travail
- savoir calculer une force, un moment, une puissance, un travail

### 2.2.2 Force et couple

La force est une grandeur vectorielle (définie par un module, une orientation et un sens, mais également un point d'application), qui caractérise la capacité à mettre en mouvement une masse. Sa définition est donc basée sur la variation temporelle de la quantité de mouvement  $\vec{p}$  (encore appelée impulsion, caractéristique d'un mouvement de translation) d'un système  $\Sigma$ , relevé dans un repère d'inertie (Galiléen en mécanique classique) :

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}, \quad (2.3)$$

où  $p$  [kg.m.s<sup>-1</sup>] est la quantité de mouvement d'une masse  $m$  [kg] animée d'une vitesse [m.s<sup>-1</sup>]. La force est exprimée en Newton [N]=[kg.m.s<sup>-2</sup>]. La quantité de mouvement étant une grandeur conservative, il n'existe pas de source de quantité de mouvement à l'intérieur du système  $\Sigma$ . Toute variation de quantité de mouvement par unité de temps pour un système  $\Sigma$  résulte donc d'un transfert de quantité de mouvement depuis l'extérieur du système  $\Sigma$ . La force est donc l'expression d'un transfert de quantité de mouvement par unité de temps.

Le couple est l'équivalent en rotation, qui caractérise la capacité à mettre en rotation un corps. Sa définition est basée sur la variation temporelle de moment cinétique :

$$\check{C} = \frac{d\check{J}}{dt}, \quad (2.4)$$

où  $\check{J}$  [kg.m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>] est le moment cinétique du corps, où  $I$  [kg.m<sup>2</sup>] est le moment d'inertie du corps autour de l'axe de rotation considéré et  $\check{\omega}$  [rad/s] la vitesse de rotation (pointe dans la direction de l'axe de rotation du corps, dans le sens direct). Dans le cas d'un solide mobile indéformable,  $I$  est en fait une composante du tenseur d'inertie  $\bar{\bar{I}}$ , une caractéristique du solide qui quantifie comment est répartie la masse par rapport aux différents axes potentiels de rotation. Exprimé dans une base  $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ , il est représenté par une matrice symétrique appelée matrice d'inertie.

La force et le couple, appelés *actions de l'extérieur sur  $\Sigma$*  permettent de mettre en mouvement (en translation et en rotation) un corps mobile.

Ce sont deux grandeurs indépendantes. Par exemple, si l'on considère le point de contact entre la roue avant de votre vélo et la route, la route exerce une force sur la roue qui évite que votre roue ne pénètre dans le sol, et elle exerce aussi un couple de résistance au roulement. Si vous dégonflez votre roue, la force ne change pas (votre roue ne pénètre toujours pas dans le sol), mais le couple augmente car il est bien plus difficile de pédaler lorsque votre pneu est dégonflé. Voilà pourquoi, les pneus sont gonflés à 8 bars pour les vélos de route.

Les relations 2.3 et 2.4 ci-dessus ne sont rien d'autre que l'écriture de la conservation fondamentale de la quantité de mouvement et du moment cinétique exprimées dans un référentiel inertiel (Galiléen en mécanique classique), sous la forme usuelle du "principe fondamental de la dynamique", en translation et en rotation. La notion de force est donc étroitement liée à cette présentation, et constitue un moyen très pratique et très utilisé pour aborder les problèmes de mécanique. Cette approche n'est cependant pas indispensable, et d'autres présentations permettent également de résoudre les problèmes mécaniques en s'affranchissant totalement du concept de force ou de moment.)

### 2.2.3 Principe d'action - réaction

Avant même d'envisager les différents modes de ce transfert de quantité de mouvement (de moment cinétique), la définition de la force Eq. 2.3 (du moment Eq. 2.4) à partir de la variable conservative de

quantité de mouvement  $\vec{p}$  ( $\check{J}$  de moment cinétique) permet d'énoncer le principe d'action-réaction, ou principe des actions réciproques :

On considère le transfert de quantité de mouvement entre deux systèmes  $\Sigma_1$  et  $\Sigma_2$  disjoints ( $\Sigma_1 \cap \Sigma_2 = \emptyset$ ), en faisant abstraction d'éventuels transferts avec le reste de l'univers. La quantité de mouvement  $\vec{p}_1$  du système  $\Sigma_1$  évolue par unité de temps d'une quantité  $\frac{d\vec{p}_1}{dt}$  qui est transférée par le système 2 sur le système 1 :  $\frac{d\vec{p}_1}{dt} = \vec{F}_{21}$ , qui est la force appliquée par le système 2 sur le système 1. Symétriquement,  $\vec{p}_2$  la quantité de mouvement du système  $\Sigma_2$  évolue par unité de temps d'une quantité transférée par le système 1 sur le système 2  $\frac{d\vec{p}_2}{dt} = \vec{F}_{12}$ , où  $\vec{F}_{12}$  est la force appliquée par le système 1 sur le système 2. Cependant, la quantité de mouvement du système  $\Sigma_{12} = \Sigma_1 \cup \Sigma_2$  ne change pas au cours du temps :

$$\frac{d\vec{p}_{12}}{dt} = 0, \quad (2.5)$$

$$\frac{d\vec{p}_1}{dt} + \frac{d\vec{p}_2}{dt} = 0, \quad (2.6)$$

$$\vec{F}_{21} + \vec{F}_{12} = 0, \quad (2.7)$$

$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}. \quad (2.8)$$

car

1. les forces  $\vec{F}_{21}$  et  $\vec{F}_{12}$  s'exercent à l'intérieur du système  $\Sigma_{12}$ ,
2. à l'intérieur de ce système il n'existe pas de source pour la grandeur conservative qu'est la quantité de mouvement.

Le même raisonnement est applicable au transfert de moment cinétique par couple, et indépendant de la définition des systèmes  $\Sigma_1$  et  $\Sigma_2$  et du mode de transfert ou du type de force. Il en résulte le principe d'action-réaction, ou principe des actions réciproques :

**Principe** L'action, transfert par unité de temps de quantité de mouvement et/ou de moment cinétique, d'un système  $\Sigma_1$  sur un système  $\Sigma_2$  au moyen d'une force  $\vec{F}_{12}$  et d'un couple  $\check{C}_{12}$  s'accompagne de l'action réciproque, ou réaction du système  $\Sigma_2$  sur le système  $\Sigma_1$ , au moyen d'une force  $\vec{F}_{21}$  et d'un couple  $\check{C}_{21}$  opposés.

## 2.2.4 Moment d'une force

Force et couple, qui décrivent les actions d'un système 1 sur un système 2, sont des grandeurs indépendantes.

Par contre, si vous désirez serrer un boulon (fig. 2.1a), vous commencerez naturellement par le visser avec deux doigts, puis le serrer avec une clef (plate ou à molette). Pour le même effort, plus la longueur de la clef sera grande, plus vous serrerez efficacement le boulon.

Pour un corps ayant la possibilité de tourner (avec un "degré de liberté de rotation") autour d'un axe  $\Delta$  passant par un point  $O$ , l'application d'une force  $\vec{F}$  en un point  $A$  du corps développe un moment

$$\check{M} = \vec{F} \wedge A\vec{O}, \quad (2.9)$$

où  $\wedge$  symbolise le produit vectoriel.

Dans le cas de votre serrage de boulon,

- si le système  $\Sigma$  englobe la pièce à serrer et le boulon (Fig. 2.1b), la frontière du système  $\Sigma$  passe à la surface extérieure du boulon : vous exercez sur le système une force  $\vec{F}$  et un moment  $\check{M}$  au point  $O$ ,
- si le système  $\Sigma$  englobe la pièce à serrer, le boulon et la clef plate (Fig. 2.1a), la frontière du système  $\Sigma$  passe par à la surface extérieure de la clef plate : vous exercez sur le système, une force  $\vec{F}$  en  $A$ .

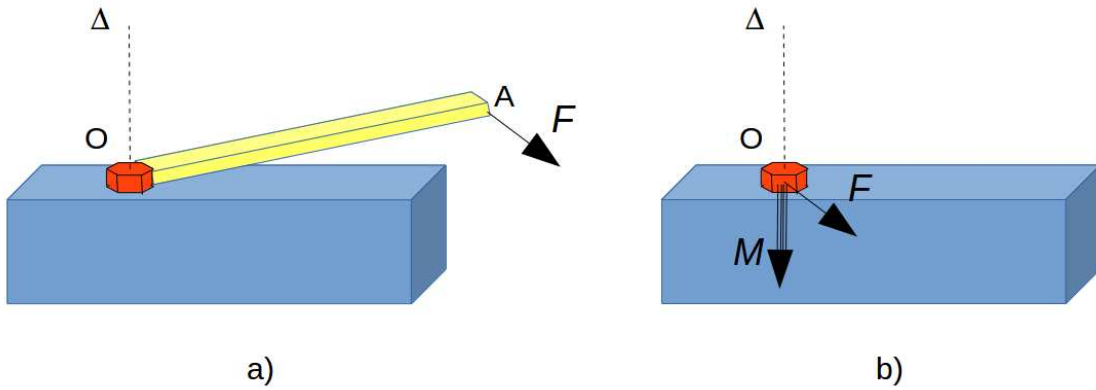


FIGURE 2.1 – Serrage d'un boulon à l'aide d'une clef plate.

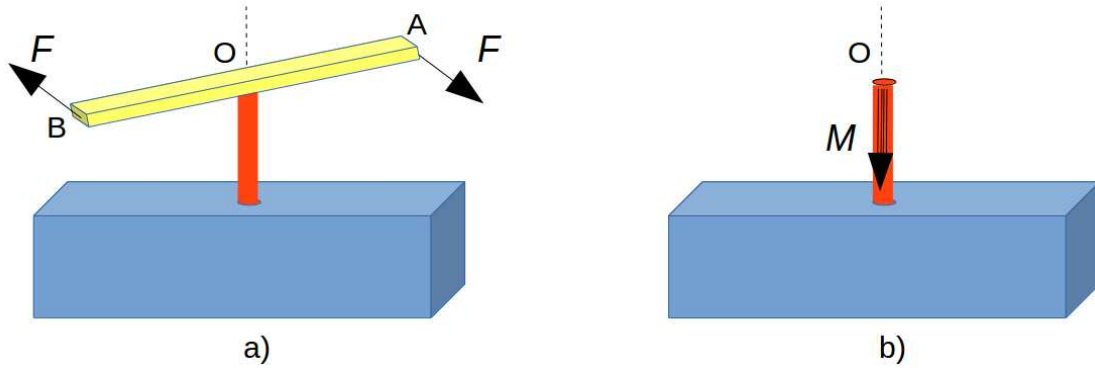


FIGURE 2.2 – Taraudage d'une pièce.

Lorsque vous devez tarauder un perçage, le taraud pour les faibles diamètre est très fragile et il est nécessaire d'éviter d'exercer une force  $\vec{F}$  sur le taraud. Le *tourne-à-gauche* permet d'exercer deux forces opposées, à la même distance de l'axe  $\Delta$  (Fig. 2.2).

Le moment de ces deux forces est alors

$$\check{M} = \check{M}_A + \check{M}_B, \quad (2.10)$$

$$= \vec{F}_A \wedge \vec{AO} + \vec{F}_B \wedge \vec{BO}, \quad (2.11)$$

$$= \vec{F}_A \wedge \vec{AO} + (-\vec{F}_A) \wedge (-\vec{AO}), \quad (2.12)$$

$$= 2\check{M}_A. \quad (2.13)$$

et avec une résultante de force nulle :

$$\vec{F} = \vec{F}_A + \vec{F}_B, \quad (2.14)$$

$$= 0. \quad (2.15)$$

## 2.2.5 Brevets d'acquisition de connaissance

Pour vérifier que vous avez assimilé ce paragraphe, je vous invite à obtenir le brevet 804.

Si vous avez des difficultés, je vous invite à contacter le référent du brevet correspondant, dont le mél est disponible sur <http://umtice.univ-lemans.fr/course/view.php?id=403>.

## 2.2.6 Une action fictive : la "force" d'inertie et le "moment" d'inertie

L'écriture des conservations de la quantité de mouvement et du moment cinétique a été ci-dessus envisagée dans un repère d'inertie (ou Galiléen en mécanique classique), non soumis à une accélération. Dans un repère accéléré, non inertiel, l'effet de l'inertie est perçu comme une force (par exemple, si vous êtes assis dans le sens de la marche d'un train qui démarre, vous ressentez au cours de votre propre accélération une "force" qui vous enfonce dans votre siège, et que vous appelez "force d'inertie" ; mais un observateur qui vous voit partir depuis le quai [repère Galiléen] comprend que c'est le siège du train qui exerce sur vous une pression vers l'avant pour vous mettre en mouvement, compte tenu de votre inertie). Dans le repère accéléré, cette grandeur, alors appelée "force d'inertie" est homogène à une force, peut être perçue comme une force, mais ce n'est cependant pas une "force" au sens défini ci-dessus, car il ne s'agit pas du transfert de quantité de mouvement (ou de moment cinétique) reçu de l'action d'un autre système, mais d'un effet de l'accélération subie en propre. C'est donc une force ou une action fictive, dont l'usage peut cependant être commode pour résoudre certains problèmes de mécanique en repères accélérés (voir un exemple en page suivante).

## 2.2.7 Puissance, travail d'une force, et les forces qui ne travaillent pas ?

La puissance  $P$  [W] = [J/s] = [N.m/s] = [kg.m<sup>2</sup>.s<sup>-3</sup>] développée par l'action d'une force  $F$  [N] et un couple  $\check{C}$  [N.m] sur un corps animé d'un mouvement  $\vec{v}$  (vitesse [m/s] en translation et  $\check{\Omega}$  [rad/s] en rotation) est :

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v} + \check{C} \cdot \check{\Omega}. \quad (2.16)$$

Si cette action est appliquée de façon constante au cours d'un mouvement relevé par le vecteur du déplacement  $\vec{d}$  [m] et le vecteur de la rotation  $\alpha$  [rad] effectués, le travail  $W$  [J] = [N.m] fourni au cours du mouvement est :

$$W = \vec{F} \cdot \vec{d} + \check{C} \cdot \check{\alpha}. \quad (2.17)$$

Ces quantités énergétiques s'expriment à partir de produits scalaires. Cela signifie que la puissance et le travail d'une force et d'un couple dépendent de l'orientation relative de la force et de la vitesse, et du couple et de la vitesse angulaire.

En particulier, si force et vitesse sont perpendiculaires entre elles, la puissance échangée et le travail effectué sont nuls : c'est par exemple le cas pour une masse ponctuelle  $m$  dans un mouvement de rotation uniforme à la vitesse angulaire  $\Omega$  au bout d'un fil de longueur  $r$  (donc avec la vitesse orthoradiale  $\vec{v} = r\Omega\vec{e}_\theta$ ) (Fig. 2.3). Au cours du mouvement, la force exercée par le fil sur la masse ponctuelle est purement radiale :

$$\vec{T} = mr\Omega\vec{e}_r, \quad (2.18)$$

$$= \frac{mv^2}{r}\vec{e}_r. \quad (2.19)$$

La vitesse  $v$  est perpendiculaire à cette direction radiale  $\vec{e}_r$ , donc cette force ne transmet aucune puissance à la masse  $m$  dont l'énergie reste constante au cours de sa rotation, ce qui est cohérent avec des vitesses de modules  $v$  et  $\Omega$  uniformes.

**Bref et ultime retour sur la force fictive d'inertie.** Dans le repère accéléré de la masse ponctuelle  $m$ , animée d'une accélération centripète  $\vec{a} = -r\Omega^2\vec{e}_r$ , la "force d'inertie" centrifuge  $F_i = mr\Omega^2\vec{e}_r$  vient "équilibrer" la force  $T$  centripète exercée sur la masse ponctuelle par la tension du fil.

Dans le cas où une puissance  $P$  [W] et un travail  $W$  [J] non nuls sont développés par l'action (force et couple) d'un système  $\Sigma_1$  sur un système  $\Sigma_2$ , cela signifie que non seulement une quantité de mouvement et/ou un moment cinétique sont transférés\* entre  $\Sigma_1$  et  $\Sigma_2$ , mais aussi éventuellement de la puissance et de l'énergie. Ainsi, les transferts de quantité de mouvement sont souvent (mais pas toujours, comme le montre ci-dessus l'exemple de la fronde) associés à des transferts d'énergie. (\* le principe d'action-réaction et la conservation de l'énergie imposent en effet que si un système augmente sa quantité de mouvement ou son énergie, c'est le résultat du prélèvement sur un autre système.)



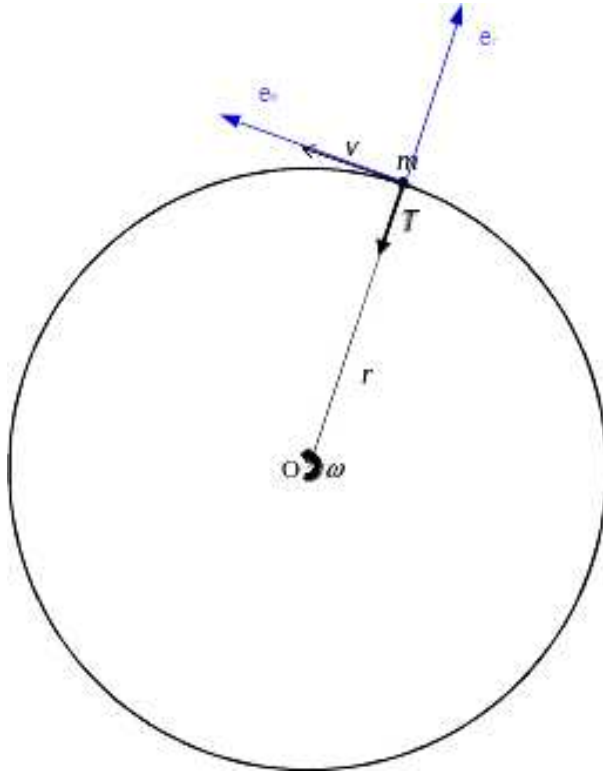


FIGURE 2.3 – Fronde.

Les transferts d'énergie concernent principalement l'énergie cinétique : schématiquement, un système qui reçoit de l'énergie l'emmagasine sous forme d'énergie cinétique et augmente sa vitesse ; un système qui cède de l'énergie la prélève sur son énergie cinétique et voit sa vitesse diminuer.

### 2.2.8 Brevets d'acquisition de connaissance

Pour vérifier que vous avez assimilé ce paragraphe, je vous invite à obtenir le brevet 806.

Si vous avez des difficultés, je vous invite à contacter le référent du brevet correspondant, dont le mél est disponible sur <http://umtice.univ-lemans.fr/course/view.php?id=403>.

### 2.2.9 Forces à distance

Une force à distance est un mode de transfert de quantité de mouvement qui existe par la seule présence, à une distance finie, de deux systèmes, même s'ils ne sont pas en contact, ni reliés par un milieu matériel. En physique, il existe seulement quatre types de forces à distance, dont deux restent à l'échelle du noyau atomique. Les définitions d'une force et d'un couple reposent sur la quantité de mouvement et le moment cinétique. A l'échelle macroscopique, les forces à distance mettent en oeuvre deux autres grandeurs conservatives fondamentales que sont la masse et la charge.

#### Force et champ de gravitation : attraction entre masses

La gravitation est la propriété qu'ont les masses à s'attirer entre elles. Ainsi, hors effet relativiste, deux masses  $m_1$  et  $m_2$  [kg] distantes d'une longueur  $d$  [m] l'une de l'autre s'attirent mutuellement (de façon identique en accord avec le principe d'action réaction). La force exercée par le corps 2 sur le corps

1 est,

$$\vec{F}_{21} = G \frac{m_1 m_2}{d^2} \vec{e}_{12}, \quad (2.20)$$

$$= m_1 \left( \frac{G m_2}{d^2} \vec{e}_{12} \right), \quad (2.21)$$

$$= m_1 \vec{g}_2, \quad (2.22)$$

avec  $\vec{e}_{12}$  le vecteur de direction la droite entre les masses  $m_1$  et  $m_2$ , de sens de  $m_1$  à  $m_2$ , et unitaire, et  $G = 6,67428 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$  est la constante universelle de gravitation. On notera que la masse se manifeste en physique sous trois formes différentes, dont la reconnaissance de l'origine commune a pris quelques siècles :

1. l'effet d'inertie,
2. le poids d'un corps,
3. l'énergie associée à la masse en relativité.

A la surface de la terre, une masse  $m$  [kg] subit donc une force  $P_g$  [N], appelée *poids* exercée "vers le bas" par la présence de la masse terrestre  $m_t$  [kg] ( $r$  [m] étant le rayon terrestre et  $\vec{e}_z$  un vecteur unitaire pointant "vers le haut") :

$$\vec{P}_g = m \vec{g}, \quad (2.23)$$

$$\vec{g} = - \left( \frac{G m_t}{r^2} \right) \vec{e}_z \quad (2.24)$$

$$= -9.81 \vec{e}_z \text{ [m.s}^{-2}\text{]}, \quad (2.25)$$

où  $g$  est appelée *gravité*. En lien avec de l'exposant  $10^{-11}$  de la constante  $G$ , cette force est relativement peu intense : deux masses de 1 kg distantes de 1 m sont attirées l'une vers l'autre par une force de  $6,67428 \cdot 10^{-11}$  N. Bien que peu intense et décroissante en  $d^{-2}$ , elle devient pourtant dominante aux très grandes échelles, faute de la concurrence avec des autres forces à distance. Sans que nous y pensions, la gravitation façonne pourtant notre environnement : elle est responsable du fait que tout ce qui est posé à terre ne bouge plus, du mouvement et de la forme des galaxies, des planètes et de la lune, de la propagation des vagues sur la mer, des marées, de la chute des pommes et de toutes sortes d'objets.

### Force électrostatique : attraction ou répulsion entre charges au repos

La force électrostatique présente de très fortes similitudes avec la force de gravitation. Pour deux charges ponctuelles  $q_1$  et  $q_2$  [C], il s'agit également d'une force orientée suivant l'axe défini par les deux charges et proportionnelle à l'inverse du carré de la distance  $d$  [m]. Elle est également proportionnelle au produit des deux charges.

$$\vec{F}_{21} = - \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_1 q_2}{d^2} \vec{e}_{12}, \quad (2.26)$$

$$= q_1 \left( - \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_2}{d^2} \vec{e}_{12} \right), \quad (2.27)$$

$$= q_1 \vec{E}_2, \quad (2.28)$$

où  $\epsilon$  est la permittivité du milieu et prend la valeur  $\epsilon_0 = 8,854187 \cdot 10^{-12} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{A}^2 \cdot \text{s}^4$  dans le vide (et augmente très légèrement pour de l'air), et  $\vec{E}_2$  le champs électrostatique créé par la particule de charge  $q_2$ .

Notez le signe "-" de l'expression du champ électrique, qui n'est pas présent pour le champ gravitationnel : deux masses positives s'attirent, mais deux charges de même signe se repoussent.

Bien que très similaires par leur structure et leurs propriétés, la comparaison des forces électrostatique et de gravitation fait apparaître deux différences importantes :

1. l'effet de la permittivité du milieu séparant les deux charges dans le cas de l'électrostatique, alors que la constante de gravitation ne dépend pas du milieu dans le cas de la gravité,
2. le fait que les charges peuvent présenter les deux signes + ou -, alors que la masse (comme l'énergie à laquelle elle est associée) est toujours positive. Ainsi, la force de gravitation est toujours attractive, alors que la force électrostatique est attractive pour des charges de signes différents, et répulsive pour des charges de même signe.

Une autre conséquence est que malgré la même décroissance suivant  $d^{-2}$  qu'en gravitation, les forces électrostatiques ont en pratique une portée plus limitée, car la matière est le plus souvent neutre aux grandes échelles (précisément car une charge a tendance à attirer les charges de signe opposé, ce qui conduit à cette neutralité).

### Force électrodynamique : force appliquée par les champs électrique $\vec{E}$ et magnétique $\vec{B}$ sur une charge en mouvement

Le champ électrique  $\vec{E}$  [V.m<sup>-1</sup>] n'est pas seul à exercer une force sur une charge  $q$  : le champ magnétique  $\vec{B}$  [T] contribue également à la force électromagnétique qui s'exprime, en présence de ces deux champs, comme :

$$\vec{F}_{em} = q \left( \vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B} \right), \quad (2.29)$$

où  $\vec{v}$  est la vitesse de la particule  $q$  par rapport au référentiel galiléen. Le champ magnétique agit donc sur les seules charges en mouvement.

Les forces électromagnétiques exercées sur une charge dépendent des champs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$ , qui résultent eux aussi de la présence et de la vitesse des charges. Ces phénomènes sont particulièrement importants à l'intérieur des couches électroniques des atomes, où les électrons (particule en mouvement présentant une masse et une charge) génèrent et subissent les effets du champ électromagnétique. Les forces électromagnétiques gouvernent donc, dans les couches électroniques extérieures, les liaisons entre les atomes pour former les molécules, mais également la distribution des charges à l'intérieur des semi-conducteurs et, à une échelle spatiale plus grande, les forces développées à l'intérieur des moteurs électriques (le courant électrique dans un conducteur est un flux de charges, donc des charges en mouvement).

### Autres forces

Les deux autres forces à distance ont une portée très limitée et n'ont d'effet qu'à l'échelle du noyau atomique ; elles sont mentionnées ici pour mémoire :

- l'interaction forte assure la cohésion des noyaux atomiques malgré la force électrostatique répulsive entre les protons de charge positive,
- l'interaction faible intervient dans le rayonnement  $\beta$  et l'interaction avec les neutrinos

#### 2.2.10 Brevets d'acquisition de connaissance

Pour vérifier que vous avez assimilé ce paragraphe, je vous invite à obtenir le brevet 805.

Si vous avez des difficultés, je vous invite à contacter le référent du brevet correspondant, dont le mél est disponible sur <http://umtice.univ-lemans.fr/course/view.php?id=403>.

#### 2.2.11 Forces de contact et forces internes

Outre les forces à distance présentées ci-dessus, et qui s'exercent entre systèmes séparés par du vide (mais également, avec parfois des propriétés légèrement différentes comme la permittivité en électromagnétisme, en présence de matière), des forces de contact et de cohésion participent également au transfert de quantité de mouvement à l'intérieur de la matière ou au contact entre deux matériaux.

## Force de contact

Le contact matériel entre deux milieux s'accompagne de forces à l'interface, par exemple entre deux solides par leur incapacité à s'interpénétrer. Le contact s'accompagne d'un effort qui peut transférer une quantité de mouvement, naturellement dans la direction normale à la surface de contact, mais souvent également dans la direction tangentielle (dans une direction du plan tangent à la zone de contact), ce qui développe des effets de frottement et contribue aux effets dissipatifs.

## Force de cohésion, forces internes

A l'intérieur même d'un milieu existent des forces de cohésion, internes (par exemple les tensions à l'intérieur d'un solide). En reprenant la définition fondamentale d'une force comme un transfert de quantité de mouvement entre deux systèmes, on comprend aisément que pour accéder à ces efforts internes, il faut diviser le milieu à étudier en deux sous-systèmes par une surface qui passe par le point où l'on souhaite accéder aux efforts internes, et étudier (par unité de temps) les efforts qui s'appliquent sur cette surface. Cette démarche est celle utilisée pour définir les contraintes à l'intérieur d'un milieu, qui s'expriment sous la forme d'un tenseur (nom qui vient des tensions internes au milieu, qui se présente comme une matrice symétrique lorsqu'il est exprimé dans une base donnée) pour traduire tout à la fois les composantes normale et tangentielle des forces par rapport à la surface fictive de coupe. Ses composantes s'expriment comme une force par unité de surface, soit un Pascal [Pa] = [N.m<sup>-2</sup>]. Cette démarche est utilisée aussi bien pour l'étude de solides déformables en élasticité que de fluides visqueux en mécanique des fluides.

## Force de pression

Dans le cas d'un fluide non visqueux (dit parfait) ou sans écoulement, l'état de contraintes à l'intérieur du fluide se réduit au paramètre de pression  $p$  [Pa] = [N.m<sup>-2</sup>], qui est alors le seul présent, au signe près, sur tous les termes de la diagonale du tenseur des contraintes. Par conséquent, la force  $\vec{F}_p$  [N] exercée sur une surface  $S$  [m<sup>2</sup>] de coupe ou sur une frontière externe du domaine fluide est

$$\vec{F}_p = pS\vec{n}, \quad (2.30)$$

où  $\vec{n}$  est la normale à la surface  $S$  orientée vers l'extérieur du volume fluide où règne la pression  $p$ .

## Force de surface, tension de surface et capillarité

La présentation la plus simple de ces forces repose sur un raisonnement énergétique et non de transfert de quantité de mouvement, puisque les deux sont souvent liés. L'interface entre deux fluides non miscibles a une surface qui peut présenter une tension de surface, en lien avec

1. les efforts de cohésion internes à chaque fluide,
2. les forces de répulsion des deux fluides non miscibles,
3. le poids,
4. éventuellement des phénomènes de changement de phase comme l'évaporation.

Ces tensions développent à leur tour des effets de pression dans chaque fluide, qui induisent par exemple la remontée de l'eau dans un tube capillaire fin, malgré les effets de gravité (effet de capillarité). Cet effet est d'autant plus fort que le diamètre du capillaire est petit ; c'est ce phénomène qui permet à une éponge ou à un papier buvard, malgré la gravité, d'absorber l'eau répandue sur une surface horizontale, bien qu'étant au dessus de cette surface.

## Autres forces

Le transfert de quantité de mouvement peut se manifester sous de multiples formes, qui peuvent par exemple combiner des effets d'inertie et de contraintes internes, comme par exemple les forces de

radiation développées par des effets non linéaires de l'acoustique. Le transfert de quantité de mouvement peut également, par exemple, être assuré par l'intermédiaire de photons. L'inventaire pourrait ne pas trouver de fin...

### **2.2.12 Brevets d'acquisition de connaissance**

Pour vérifier que vous avez assimilé ce paragraphe, je vous invite à obtenir le brevet 807.

Si vous avez des difficultés, je vous invite à contacter le référent du brevet correspondant, dont le mél est disponible sur <http://umtice.univ-lemans.fr/course/view.php?id=403>.

## 2.3 Instrumentation (1 séance)

### 2.3.1 Objectifs

- Pied à coulisse, vernier angulaire, butée micrométrique.
- Usage d'un générateur de fonctions
- Usage d'un multimètre
- Usage d'un oscilloscope. Modes AC/DC. Zéro et masse. Réglages pour un usage à pleine échelle/plein cadran.

### 2.3.2 Pied à coulisse, vernier angulaire, butée micrométrique.

Les mesures de longueurs, de distances peuvent être précises par l'utilisation d'une double échelle. A titre d'exemple, la figure 2.4 montre deux échelles : l'échelle A est l'échelle de référence graduée en cm, et l'échelle B est graduée aussi mais sur une distance réduite de 10% comme le montre la figure a). La mesure d'une longueur de pièce consiste à déplacer l'échelle B comme montré sur la figure b). On lit alors en face de la première graduation à gauche de l'échelle B que la distance est comprise entre 1,6 cm et 1,7 cm. On recherche ensuite la coïncidence entre les graduations des échelles B et A. Dans l'exemple cette coïncidence apparaît pour la 3<sup>ème</sup> graduation (la première graduation à gauche est repérée par 0). La valeur de la longueur est donc  $1,6+0,03=1,63$  cm. Le même principe avec une double échelle est utilisé pour des mesures d'angle, ou de profondeur.

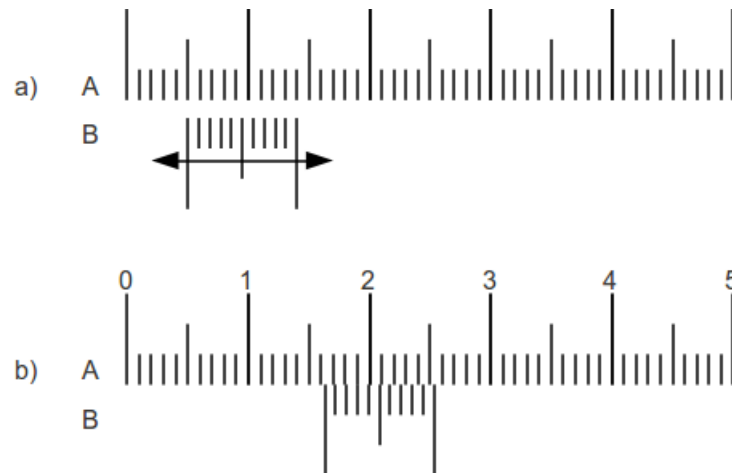


FIGURE 2.4 – Curseurs d'un pied à coulisse

### 2.3.3 Usage d'un générateur de fonctions

Un générateur de fonction, permet de créer des signaux temporels électriques de différentes formes (sinus, carré, triangle...) et amplitudes, pour certaines variables dans le temps : sinus glissant (chirp). Le signal, précis, est de faible tension et de faible intensité. Il est en général associé à un amplificateur qui permet d'avoir de la puissance pour alimenter l'actionneur (haut-parleur, pot vibrant...). Bien que certains appareils soient d'utilisation intuitive, il est parfois utile d'avoir au moins lu une fois la notice. Des générateurs de fonctions sont souvent intégrés à des appareils d'analyse de signal (analyseur de spectre).

### **2.3.4 Usage d'un multimètre**

Un multimètre permet de mesurer une tension alternative ou continue, une intensité, une résistance. Pour être le plus précis possible dans cette mesure, il est nécessaire de choisir correctement la gamme de mesure. Bien que certains appareils soient d'utilisation intuitive, il est parfois utile d'avoir au moins lu une fois la notice.

### **2.3.5 Usage d'un oscilloscope. Modes AC/DC. Zéro et masse. Réglages pour un usage à pleine échelle/plein cadran.**

Un oscilloscope permet de mesurer une tension, l'évolution dans le temps d'une tension. Pour être le plus précis possible dans cette mesure, il est nécessaire de choisir correctement la gamme de mesure et l'échelle de temps. On veillera à identifier l'existence ou non d'une composante continue dans le signal. Bien que certains appareils soient d'utilisation intuitive, il est parfois utile d'avoir au moins lu une fois la notice.

### **2.3.6 Brevet d'acquisition de connaissance**

Pour vérifier que vous avez assimilé ce paragraphe, je vous invite à obtenir les brevets 061, 402, 403, 404.

Si vous avez des difficultés, je vous invite à contacter le référent du brevet correspondant, dont le mél est disponible sur <http://umtice.univ-lemans.fr/course/view.php?id=403>.

### **2.3.7 Brevet de vérification de connaissance**

Pour vérifier que vous savez réinvestir cette connaissance sur un autre cas, je vous invite à obtenir les brevets 061 bis, et à refaire les brevets 402 403 et 404 avec un autre détenteur de ces brevets. Si vous avez des difficultés, je vous invite à contacter le référent du brevet correspondant, dont le mél est disponible sur <http://umtice.univ-lemans.fr/course/view.php?id=403>.

## 2.4 Représenter des mesures (1 séances)

### 2.4.1 Objectifs

- Echantillonner intelligemment une série de mesures
- Présenter des mesures : chiffres significatifs ; tableaux ; graphes

### 2.4.2 Echantillonner intelligemment une série de mesures

Nous nous plaçons dans le cas où vous souhaitez mesurer la relation entre une grandeur  $a$  et une grandeur  $b$  d'un système, et que vous mesurez ces deux grandeurs directement avec deux appareils. Vous choisissez l'un des deux paramètres comme paramètre de contrôle, par exemple  $a$ . C'est donc celui-ci dont vous ajustez les valeurs et observez la réponse du paramètre  $b$ .

1. Si vous connaissez à priori la gamme de variation possible de  $a$  (par exemple la force minimale et la force maximale admissible par le système), alors la démarche la plus logique est :
  - mesure pour  $a$  mini, pour  $a$  maxi et pour  $a$  milieu de ces valeurs, des valeurs correspondantes de  $b$ ,
  - tracé du graphique  $b$  en fonction de  $a$ ,
  - si l'évolution semble linéaire, rajouter des points en divisant par deux chaque intervalle
  - si l'évolution n'est pas linéaire, rajouter des points dans la zone où  $b$  évolue le plus vite.
  - itérer cette démarche, jusqu'à avoir une description "suffisante" de la relation entre  $a$  et  $b$ .
2. Si vous n'avez aucune information sur les gammes de variations de  $a$  et  $b$ , alors à partir de  $a$  mini, incrémentez  $a$  jusqu'à obtenir une variation mesurable de  $b$ , puis refaire des incréments de  $a$  de même amplitude et mesurez l'évolution de  $b$ . Si la loi est à priori non linéaire (plasticité pour une structure...) à partir d'un certain seuil, arrêter dès la détection d'une non linéarité.
3. Si vous ne connaissez pas la gamme de variation possible de  $a$ , mais connaissez la gamme de variation possible de  $b$ , faites la mesure pour  $a$  mini, puis ajustez  $a$  afin d'atteindre  $b$  maxi, puis reprendre la démarche 1.

### 2.4.3 Présenter des mesures : Chiffres significatifs ; tableaux ; graphes

Si vous souhaitez présenter une mesure expérimentale, l'appareil utilisé a une précision dont vous devez avoir une idée. Pour cela il vous faut consulter la notice, ou, pour une première approximation, l'estimer par le produit de la classe de l'appareil par la pleine échelle : un voltmètre de classe 2, de pleine échelle 40 mV, a une précision de l'ordre de  $\frac{2}{100}40 = 0.8$  mV. N'affichez pas dans ce cas une mesure de 34,567 mV, des enseignants plein d'humour ne manqueront pas de noter votre compte-rendu avec 12 chiffres significatifs. Vous souhaitez présenter un résultat dans un tableau ? Mettez-le en annexe ! Puis posez-vous la question : quel est le graphique basé sur ce tableau qui présente la même idée de façon bien plus visuelle. Dans l'annexe, si votre tableau présente chaque essai sur une ligne, la première ligne doit indiquer la grandeur de la colonne, la seconde ligne les unités utilisées. Si une colonne présente des résultats issus d'une formule mathématique à base de données expérimentales, que vos données expérimentales ont 3 chiffres significatifs, les résultats issus de calcul n'ont pas nécessairement 12 chiffres significatifs ! Un tableau est accompagné d'une légende.

$a$	$b$	$c = ab$
m	mV	V.m
12	2.34	0.028
23	2.78	0.064

Tab. 23 : Joli tableau bien présenté et non absurde scientifiquement parlant.

Un graphe est l'expression visuelle d'une relation entre plusieurs grandeurs. Si la tendance est visible "du premier coup d'oeil", il doit néanmoins comporter suffisamment d'information pour que le lecteur puisse retrouver les valeurs... qui sont dans le tableau en annexe. Sauf clause de confidentialité, doivent



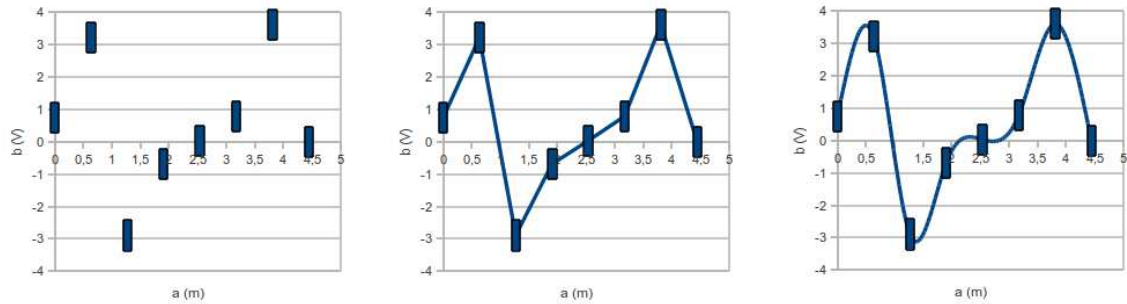


FIGURE 2.5 – Représentations graphiques d’un même jeu de données expérimentales dont les incertitudes sont de  $\pm 0.1$  m sur  $a$  et  $\pm 0.5$  V sur  $b$  : le graphique a) est le plus explicite, le graphique c) empêche la reconnaissance de la fonction tangente.

être présents sur chaque axe, les échelles, les unités, la grandeur représentée, ainsi qu’une légende. Si vous souhaitez que l’amplitude de la variation de  $b$  en fonction de  $a$  soit estimable “du premier coup d’oeil”, l’échelle de  $b$  doit comporter la valeur 0. Si la répartition des valeurs de  $a$  et de  $b$  sont fortement non linéaires, un graphe semi-logarithmique ou bi-logarithmique est à envisager. Dans un graphe sont représentés des couples  $(a_i, b_i)$ . Entre deux points, aucune mesure n’est faite, aussi il est scientifiquement logique de ne pas relier ces points. Si plusieurs jeux de données sont présents dans un même graphe,  $(a_i, b_i)$  et  $(a_i, c_i)$ , utilisez des formes de points différentes, et si la lisibilité entre les deux courbes n’est pas suffisante, il est possible de relier les points par **des segments de droite**. Evitez absolument de relier ces points par des courbes dérivables : vous pourriez faire croire que des points intermédiaires existent entre vos points de mesures et vous faites croire au lecteur qu’un modèle sous-jacent à cette courbe a été utilisé. A titre d’illustration sur la figure 2.5, des points expérimentaux sont tracés. Le graphique a) est préférable. Le graphique b) n’apporte pas une lisibilité plus grande qui justifie de relier les points. Le graphique c) est à proscrire absolument, car il vous empêche de détecter la fonction qui a servi à construire ces points expérimentaux..., vous l’aviez deviné :  $b = \tan(a)$ .

#### 2.4.4 Brevet d’acquisition de connaissance

Pour vérifier que vous avez assimilé ce paragraphe, je vous invite à obtenir les brevets 062, 063 et 064.

Si vous avez des difficultés, je vous invite à contacter le référent du brevet correspondant, dont le mél est disponible sur <http://umtice.univ-lemans.fr/course/view.php?id=403>.

#### 2.4.5 Brevet de vérification de connaissance

Pour vérifier que vous savez réinvestir cette connaissance sur un autre cas, je vous invite à obtenir les brevets 062bis. Si vous avez des difficultés, je vous invite à contacter le référent du brevet correspondant, dont le mél est disponible sur <http://umtice.univ-lemans.fr/course/view.php?id=403>.