

## Introduction

Un avion peut, d'une manière générale, être décomposé en un nombre limité de sous-ensembles : cellule, groupe motopropulseur, commandes de vol, servitudes de bord, avionique, emports internes ou externes. Ces éléments, à quelques exceptions près, sont présents sur tous les appareils.

Pour chaque type d'appareil on retrouve des positionnements relatifs de ces ensembles assez semblables, si on ne tient pas compte de la période des pionniers de l'aviation ou des prototypes restés sans suite.

### I.1. Contrainte de conception des structures d'avions

Les points communs apparus depuis la naissance de l'aviation et qui resteront très probablement d'actualité au long du XXI siècle, pour une fonction ou une capacité opérationnelle donnée, sont le plus souvent liés à des contraintes de conception dont :

- la simplicité de réalisation ;
- la diminution de la masse grâce à l'emploi de matériaux plus légers et plus résistants ;
- la diminution de la traînée grâce aux progrès de l'aérodynamique;
- l'augmentation des performances souvent liée aux deux points ci-dessus et à l'évolution de la motorisation ;
- l'amélioration de la fiabilité.

À ces points s'ajoutent, essentiellement pour les avions civils :

- L'amélioration de la sécurité.
- La diminution des pollutions
- Les économies d'énergie

### I.2. La mécanique des milieux continus :

La mécanique des milieux continus est le domaine de la mécanique qui s'intéresse à la déformation des solides et à l'écoulement des fluides. Ce dernier point faisant l'objet de l'article mécanique des fluides, cet article traite donc essentiellement de la déformation des solides.

### **I.2.1. Le milieu continu :**

Si l'on regarde la matière à l'échelle nanoscopique, la matière est granulaire, faite de molécules. Mais à l'œil nu, un objet solide semble continu, c'est-à-dire que ses propriétés semblent varier progressivement, sans à-coups. L'hypothèse des milieux continus consiste à considérer des milieux dont les propriétés caractéristiques, c'est-à-dire celles qui nous intéressent densité, élasticité, etc. sont continuës. Une telle hypothèse permet d'avoir recours aux outils mathématiques reposant sur les fonctions continues et/ou dérivables

Des hypothèses supplémentaires peuvent éventuellement être faites ; ainsi un milieu continu peut être :

- homogène : ses propriétés sont les mêmes en tout point ;
- isotrope : ses propriétés ne dépendent pas du repère dans lequel elles sont observées ou mesurées.

De nombreux matériaux utilisés dans l'industrie sont à la fois homogènes et isotropes (métaux usinés ou bruts de fonderie). Cependant, de nombreux matériaux ne sont pas isotropes (tôles laminées, pièces forgées, pièces tréfilées, etc.) ; par ailleurs, l'utilisation de plus en plus fréquentes des matériaux composites a amené à étudier les milieux qui ne sont ni homogènes (sandwiches), ni isotropes (fibres de verre, de carbone ou de kevlar maintenues dans une résine) mais pour lesquels l'hypothèse de continuité (tout au moins par morceaux) reste valable.

### **I.2.2. La résistance des matériaux :**

La résistance des matériaux est la science qui traite les méthodes employé dans le calcul de la résistance la rigidité et la stabilité des éléments

La résistance des matériaux (RDM) est aussi une discipline particulière de lamécanique des milieux continus permettant le calcul des contraintes et déformations dans les structures des différents matériaux (machines, génie mécanique, bâtiment et génie civil).

La RDM permet de ramener l'étude du comportement global d'une structure (relation entre sollicitations —forces ou moments— et déplacements) à celle du comportement local des matériaux la composant (relation entre contraintes et déformations). L'objectif est de concevoir la structure suivant des critères de résistance, de déformation admissible et de coût financier acceptable.

Lorsque l'intensité de la contrainte augmente, il y a d'abord déformation élastique (le matériau se déforme proportionnellement à l'effort appliqué et reprend sa forme initiale lorsque la sollicitation disparaît), suivie parfois (en fonction de la ductilité du matériau) d'une déformation plastique (le matériau ne reprend pas sa forme initiale lorsque la sollicitation disparaît, il subsiste une déformation résiduelle), et enfin rupture (la sollicitation dépasse la résistance intrinsèque du matériau).

- **La résistance** c'est la capacité d'une structure ou de ses éléments de supporter des chargements.
- **La rigidité** c'est la capacité d'une structure ou de ses éléments à s'opposer à un effort extérieur qui essaie de la déformer.
- **La stabilité** c'est la capacité de garder la forme initiale d'une structure ou de ses éléments ça correspond à l'Etat d'équilibre élastique.

### I.2.3 Les théorèmes énergétiques

Les théorèmes énergétiques permettant de poser un problème de mécanique sous forme d'un problème de minimisation, et donc d'utiliser toutes les méthodes existantes pour ce genre de problèmes. Il y a deux théorèmes énergétiques, l'un est beaucoup plus connu que l'autre, il s'agit du théorème de l'énergie potentielle. Le second théorème est similaire au premier, la seule différence étant que dans un cas on parle de l'énergie potentielle et dans l'autre de l'énergie complémentaire.

#### I.2.3.1 L'énergie complémentaire de déformation

L'énergie complémentaire est désignée par la différence entre l'énergie de déformation du solide étudié, exprimée avec les quantités relatives aux efforts, et le travail de ces quantités aux interfaces avec le milieu extérieur ou le déplacement est imposé.

Dans un cadre plus générale, dans une modélisation mécanique, on introduit souvent des grandeurs duales, telles que les couples déplacements /efforts déformation/contrainte (citons l'exemple de la méthode des éléments finies), liés par une relation de comportement. De cette donnée d'un couple et d'une relation, on peut déduire deux potentiels, l'un exprimé en fonction des grandeurs primales est appelé l'énergie potentielle, l'autre énergie complémentaire. Elle intervient dans les théorèmes énergétiques en mécanique des milieux continus.

## I.2. 4. Contraintes mécaniques élémentaires :

En mécanique des milieux continus, et en résistance des matériaux en règle générale, la contrainte mécanique décrit les forces que les particules élémentaires d'un milieu exercent les unes sur les autres par unité de surface. Ce bilan des forces locales est conceptualisé par un tenseur d'ordre deux : le tenseur des contraintes. La contrainte va de pair avec une déformation de la matière dans laquelle elle s'exerce. La contrainte mécanique est homogène à une pression (Pa).

### I.2.4.1.) Traction / Compression

Cette contrainte est dite contrainte normale due à la force de traction. Est égale à l'intensité de la force divisée par l'aire de la surface normale à cette force. Le critère de résistance est rempli lorsque la contrainte maximale reste inférieure à la contrainte limite. La première correspond à la contrainte calculée ci-dessus, éventuellement multipliée par divers facteurs tels que :

- un facteur de concentration de contraintes qui dépend de la géométrie de la un facteur d'amplification dynamique ;
- divers autres facteurs de sécurité (sur les sollicitations).

La contrainte limite correspond généralement à la limite élastique éventuellement divisée par des facteurs de sécurité (sur la résistance)

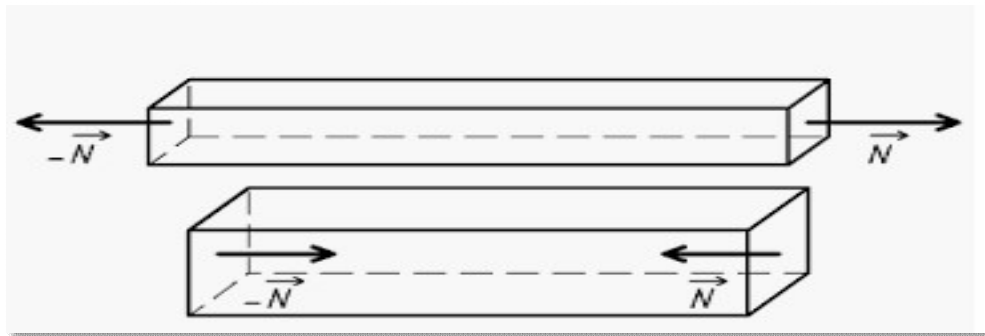


Figure I.1. Traction et compression

### I.2.4.2.) Le cisaillement

On a du cisaillement simple lorsque l'on applique deux forces qui sont perpendiculairement à l'axe, les points d'application étant *légèrement décalées* s'ils sont au droit, on a du pincement, et s'ils sont très éloignés, on a de la flexion. On remarque au passage qu'il en résulte un moment de couple  $T \times d$ , qui doit être compensé par ailleurs, c'est ce couple qui

créée de la flexion si  $d$  est important et qui différencie le cisaillement pur du cisaillement simple (qui lui contient un moment de flexion)

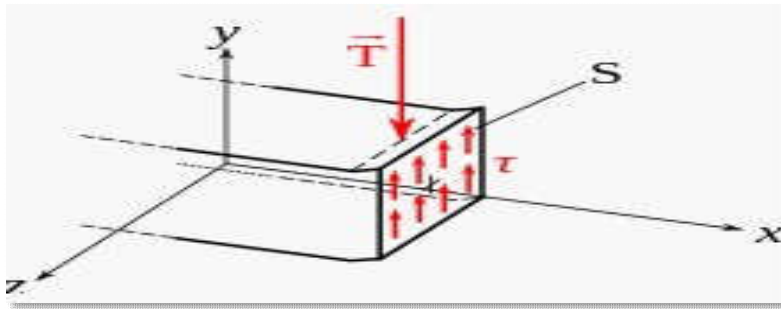


Figure I.2. Le cisaillement

### I.2.4 .3.) La flexion :

La flexion est la déformation d'un objet sous l'action d'une charge. Elle se traduit par une courbure. Dans le cas d'une poutre, elle tend à rapprocher ses deux extrémités. Dans le cas d'une plaque, elle tend à rapprocher deux points diamétralement opposés sous l'action.

L'essai de flexion d'une poutre est un essai mécanique utilisé pour tester la résistance en flexion. En chaudronnerie, le pliage d'une tôle est une flexion pour laquelle on veut dépasser la limite élastique du matériau, afin d'avoir une déformation définitive (déformation plastique). Dans la plupart des autres cas, on cherche au contraire les conditions nécessaires pour ne pas dépasser la limite élastique, afin de préserver l'intégrité de la pièce. Sous l'effet du moment de flexion (en Nm), la contrainte de flexion à une distance (en m) de la fibre neutre s'exprime en fonction du moment quadratique (en  $m^4$ ) de la section.

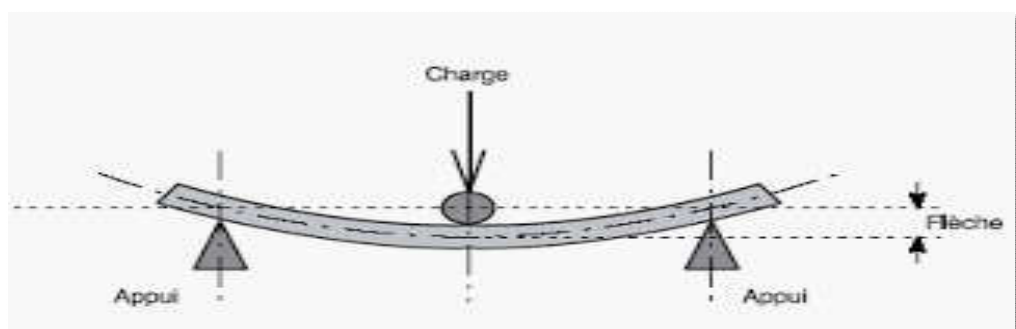


Figure I.3. Flexion d'une poutre

Sous l'effet du moment de flexion  $M$  (en Nm), la contrainte de flexion à une distance  $(d)$  (en m) de la fibre neutre s'exprime en fonction du moment quadratique  $(I)$  (en  $m^4$ ) de la section étudiée par la relation :

$$\sigma = \frac{M d}{I} \quad \text{Eq (1.1)}$$

Avec

$$I = \int d^2 ds \quad \text{Eq (1.2)}$$

Le moment quadratique, qui est habituellement désigné par inertie de la section par rapport à l'axe du moment de flexion.

#### **I.2.4.4. La torsion :**

La torsion s'exprime sous la forme d'un moment de torsion  $M_t$  agissant dans l'axe  $x$  de la poutre. Sous l'effet de la torsion, les sections transversales de la poutre ne restent généralement pas planes, Lorsque leur gauchissement est libre, seules des contraintes tangentielles  $\tau$  apparaissent et la poutre n'est soumise qu'à de la torsion dite uniforme. Lorsque leur gauchissement est empêché, par exemple par un encastrement en rotation, ou que le moment de torsion n'est pas constant, provoquant un gauchissement variable d'une section transversale à l'autre, des contraintes normales  $\sigma$  apparaissent en plus des contraintes de cisaillement et la barre est soumise à de la torsion « non uniforme ».

La torsion non uniforme est toujours accompagnée de la torsion uniforme. Le moment de torsion  $M_t$  peut donc se décomposer en la somme

- d'une part uniforme  $M_v$  (généralisant de la contrainte tangentielle  $\tau$ ) et
- d'une part non uniforme  $M_w$  (généralisant de la contrainte normale  $\sigma$ ).

Une section fermée ou trapue (compacte) travaille principalement en torsion uniforme ; dans le cas d'une poutre dont la section présente une symétrie de révolution (section circulaire ou annulaire par exemple), les contraintes de cisaillement varient de manière linéaire lorsque l'on s'éloigne de la fibre neutre.

Les sections ouvertes ou sans symétrie de révolution travaillent principalement en torsion non uniforme et le problème est plus complexe. En particulier, la contrainte à une surface

libre (qui n'est pas en contact avec une autre pièce) est nécessairement dans le plan tangent à cette surface, et notamment la contrainte à un angle libre est nécessairement nulle.

Lorsqu'aucune part de torsion n'est prédominante, on parle de « torsion mixte » ; c'est le cas notamment des profilés laminés.

### I.2.4.5. Le Moment statique

En résistance des matériaux, le moment statique est une grandeur physique qui caractérise la géométrie d'une section et se définit par rapport à un axe. Il intervient notamment dans le calcul des contraintes de cisaillement. Il a la dimension d'un volume (en  $m^3$  dans le système international d'unités).

Le moment statique d'une section par rapport à l'axe se définit comme :

$$\begin{aligned} Q &= \iint y \, dx \, dy & \text{Eq (1.3)} \\ Q &= \iint x \, dx \, dy \end{aligned}$$

### I.2.4.6. Le moment quadratique

Le moment d'inertie est une grandeur qui caractérise la géométrie d'une section et se définit par rapport à un axe ou un point. Il s'exprime dans le système international en  $m^4$  (mètre à la puissance 4).

Le moment quadratique est utilisé en résistance des matériaux, il est indispensable pour calculer la résistance et la déformation des poutres sollicitées en torsion ( $I_g$ ) et en flexion ( $I_y$  et  $I_x$ ). En effet, la résistance d'une section sollicitée selon un axe donné varie avec son moment quadratique selon cet axe.

Le moment quadratique est encore très souvent appelé moment d'inertie. Cependant, bien qu'il présente de claires similitudes, il ne rend compte que de la géométrie d'une section et non de sa masse.

Le moment quadratique d'une section par rapport à l'axe se définit comme

$$I_y = \iint x^2 \, dx \, dy \quad (1.5)$$

$$I_x = \iint y^2 \, dx \, dy \quad (1.5.a)$$

$$I_{xy} = \iint xy \, dx \, dy \quad (1.5.b)$$

### I.2.4.6. Le théorème de Huygens

Le théorème de Huygens permet de calculer le moment quadratique d'une section coupée en plusieurs morceaux. Pour chaque morceau, son moment par rapport à un axe

Arbitraire dépend de son moment par rapport à l'axe de gravité  $G$  parallèle à  $A$ , à sa section  $S$  et la distance entre les axes et selon l'expression :

$$I_a = I_g + sd^2 \quad (1.6)$$

### I.3. Le fuselage

Le fuselage **est** la carcasse en forme de fuseau constituant le corps d'un avion ou d'un planeur et dont la forme facilite la pénétration dans l'air. Il est, avec la voilure<sup>2</sup>, l'empennage et le train d'atterrissage, un constituant de la cellule d'un aérodyne. Il est aménagé pour contenir la charge utile transportée, ainsi que le poste d'équipage. Le fuselage est le point d'attache de la voilure et de l'empennage ainsi que, fréquemment, le train d'atterrissage. Il peut aussi contenir tout ou partie du groupe motopropulseur.

La forme d'un fuselage est étudiée pour réduire sa traînée aérodynamique, d'où son nom, issu du verbe fuseler qui signifie littéralement rendre étroit. Les avions pressurisés ont souvent une section circulaire qui résiste mieux aux contraintes. Les hydravion sont un dessous de fuselage en forme de coque planante pour se poser sur l'eau. La configuration classique est de type « tube et aile ».

Sur les ULM et sur les anciens avions le fuselage peut se réduire à une poutre ou un treillis. Au début du XXI siècle, tous types d'avions confondus, l'utilisation d'alliages à base d'aluminium reste la plus courante mais les matériaux composites font une percée notable pour les avions de transport de passagers et pour les avions militaires de combat.

#### I.3.1 Les différents types de fuselages

Le fuselage d'un avion est souvent constitué d'éléments longitudinaux et transversaux qui donnent la forme et la résistance à l'ensemble. Si les éléments longitudinaux de principale résistance sont des longerons fixés sur des couples, le tout recouvert d'un revêtement travaillant, on dit que la construction est semi monocoque. Si les éléments longitudinaux sont constitués par un revêtement raidi fixé sur des couples, on dit que la construction est monocoque.



### I.3.1.1. Fuselage des premiers avions

Il est composé de quatre longerons en frêne reliés par des montants et traverses. L'ensemble est ensuite raidi par des cordes à piano. De façon à diminuer au maximum le poids, l'intérieur du poste de pilotage est en rotin. Le support du train d'atterrissage est robuste afin de pouvoir encaisser le choc d'un contact brutal avec le sol. Seul l'avant du fuselage est entoilé. Plus tard lors des progrès en connaissance aérodynamique les fuselages seront entièrement entoilés et profilés.

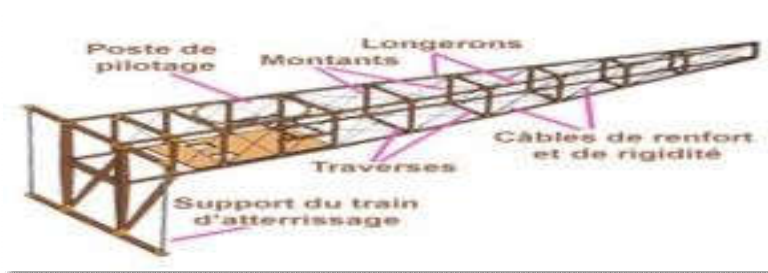


Figure1.4. Fuselage des premiers avions (fuselage d'un Blériot).

### I.3.1.2) Fuselage coque

Le fuselage coque est assimilable à la construction d'un caisson à âmes multiple de la voilure. Les longerons n'existent plus en tant que tels, les couples fixés au revêtement travaillant forment des raidis, encaissant la totalité des efforts répartis de flexion et torsion. Aux endroits où se situent des efforts localisés, des coupes fortes sont placés. Au niveau des hublots, les orifices étant fortement encadrés, on peut voir une réalisation caisson (revêtement faiblement travaillant fixé sur les ailes internes des couples) constituant un véritable longeron.

### I.3.1.3.) Fuselage semi monocoque

Les fuselages semi monocoques sont composés de :

- Les longerons encaissent les efforts de flexion en totalité.
- Les couples encaissent les efforts de torsion en totalité.
- Le revêtement travaillant transmet ces divers efforts entre tous les éléments.
- La structure semi monocoque se caractérise donc essentiellement par des

- longerons, des couples et un revêtement travaillant.

Les semi monocoques sont également des structures coques réalisées en plusieurs tronçons et assemblées en fin de fabrication. Dans ce cas, des couples importants sont positionnés à chaque extrémité du tronçon pour permettre une transmission continue de l'effort.

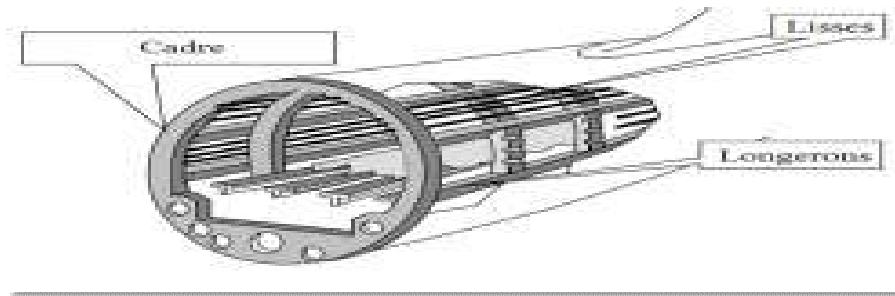


Figure I.5. Fuselages semi-monocoques.

#### I.3.1.4.) Fuselage Monocoque

Lorsque la structure est dite monocoque, le revêtement (tôle d'aluminium ou contreplaqué) participe à la transmission des efforts. Ce revêtement est alors qualifié de travaillant. Celui-ci est fixé sur des cadres, ou cloisons verticales, par collage, rivetage ou vissage.

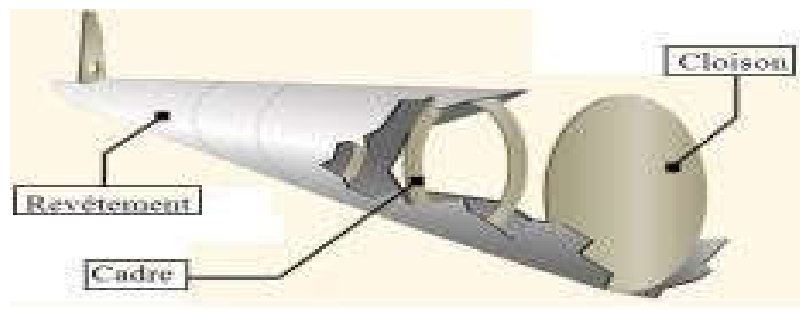


Figure I.6. Structure d'un Fuselage Monocoque

### I.3.2. Les éléments du fuselage Monocoque

Les éléments constitutifs de la structure du fuselage sont essentiellement constitués de :

- Les lisses situées dans le sens longitudinal.

- Le revêtement.
- Les couples situés dans le sens transversal.

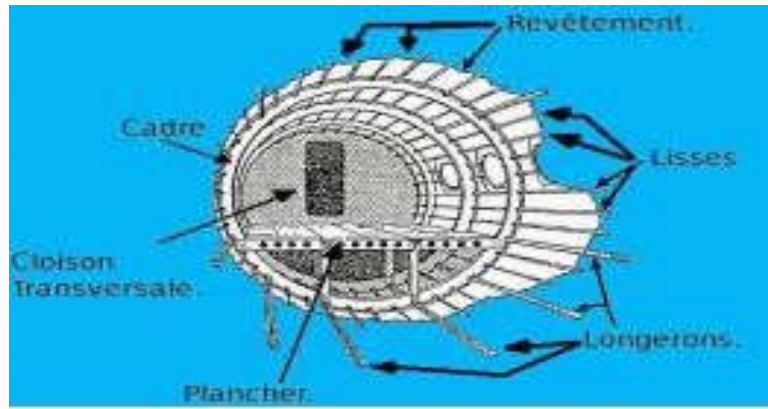


Figure I.7. Eléments du fuselage

### I.3.2.1. Les lisses

Beaucoup plus fins que les longerons, leur participation à la rigidité de l'ensemble est nettement plus modeste, mais ils sont absolument nécessaires pour supporter le revêtement, et lui donner sa forme. Sur certaines constructions récentes, les lisses, plus nombreux, et plus solides assurent seules la rigidité de la cellule, qui, des lors, ne contient aucun longeron.

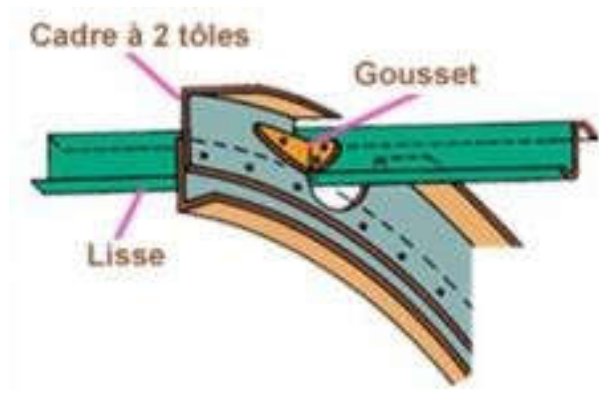


Figure I.8. Les lisses du fuselage.

Leur nombre est important mais variable d'un avion à un autre. Ils sont soudés par points, quelquefois rivés sur le revêtement.

### I.3.2.2. Couples et cadres

Ils donnent la forme du fuselage ils assurent La rigidité transversale, et le support d'efforts locaux importants.

On trouve, sur un même fuselage, deux types de couples :

#### ❖ Les cadres forts

On les trouve dans les endroits où les efforts sont importants notamment aux jonctions du fuselage avec les ailes et de l'empennage, au train d'atterrissage, aux cloisons de fin de pressurisation ainsi qu'au niveau des réacteurs si ceux-ci sont accrochés au fuselage.

#### ❖ Les cadres courants

Espacés régulièrement le long du fuselage, ils jouent un rôle crucial pour la structure de l'avion en intégrant les efforts dus à la pressurisation encaissés par le revêtement.

Les cadres courants sont constitués d'une ou de deux tôles pliées et rivetées entre elles.



Figure I.9. Les cadres forts et courants

En générale, les couples spéciaux, étanches et très résistants assurent la séparation des compartiments pressurisés et non pressurisés de l'appareil. Tandis que les couples courants sont réalisés à partir de profilés ou de tôle d'alliage léger pliée dont une aile ou des bords tombés permettent la liaison au revêtement. Les couples forts ont souvent une structure caisson réalisée par assemblage de plusieurs profilés, une épaisse semelle rapportée assure la fixation au revêtement. Toutefois, suivant l'importance des efforts supportés les couples forts ont des structures très variables sur un même avion, certains couples étant en construction treillis composés d'un nombre important de pièces élémentaires. Sur chaque couple se trouve une fixation de part et d'autre de son axe de symétrie pour recevoir une traverse de plancher. Cette traverse est quelquefois étauçonnée par deux étais. L'ensemble travers, étais, et plancher constitue une véritable poutre s'opposant aux contraintes de flambage de la partie inférieure du fuselage.

### I.3.2.3) Les revêtements

Les revêtements sont réalisés par des plaques d'alliage léger (A.U4G ou A.UGN), en forme épaisses ou minces qui sont plus raide et lisse respectivement

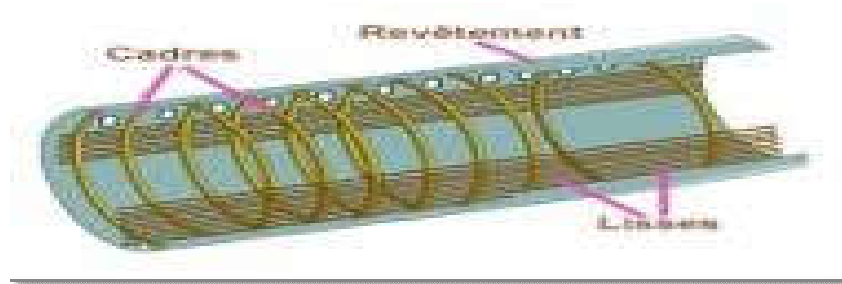


Figure I.10. Les revêtements

### I.3.2.4) Le plancher

Le plancher sert également à renforcer la rigidité de la structure. De chaque côté les portes de la cabine ouvertes. Tronçon central l'Airbus 380 avec ses trois planchers. Un plancher soute et deux planchers cabine.



Figure I.11. Le plancher.