



Les panneaux sandwich à âme pliée

La motivation originelle de ce travail est l'étude d'un nouveau type d'âme de panneau sandwich : le module à chevrons. En effet le marché des panneaux sandwichs est un marché encore jeune et en mutation dans lequel il existe des opportunités d'innovation. En particulier les panneaux sandwichs offrent des possibilités d'économie de matière dans l'habitat qu'il est tout à fait d'actualité de considérer. Étudier un nouveau type d'âme de panneau sandwich nécessite donc une bonne compréhension de ce marché ainsi que des questions scientifiques sous-jacentes.

Dans ce chapitre, on propose tout d'abord une présentation des pliages structurels périodiques en Section 2.1. En vue de leur utilisation comme âme de panneau sandwich, une introduction à ces panneaux et leur marché est proposée en Section 2.2. Cette analyse mettra en évidence que ce marché est essentiellement structuré autour du comportement mécanique des panneaux sandwichs. Plus particulièrement, une analyse mécanique simplifiée montre que l'âme joue un rôle essentiel dans la résistance du panneau sandwich à l'effort tranchant. Finalement, en gardant en mémoire les contraintes posées par le marché des panneaux sandwichs, une revue des procédés technologiques existants est effectuée en Section 2.3.

2.1 Les pliages structurels périodiques

Les pliages structurels périodiques sont des pliages périodiques qui donnent un volume à la feuille initialement plane. Ainsi la feuille présente un relief qui peut être exploité pour ses propriétés cinématiques ou structurelles. Un exemple simple est le soufflet d'un accordéon qui permet les amples mouvement du musicien tout en servant de réserve d'air à débit contrôlé.

Il existe un très grand nombre de pliages de ce type. On donne ici quelques éléments pour les distinguer puis on indiquera quelques applications envisageables pour le plus connu d'entre eux, le module à chevrons.

2.1.1 Les différents types de pliages structurels périodiques

Les pliages structurels périodiques sont aussi nommés tessellations (pavages) dans le vocabulaire des origamistes (plieurs de papier). Ils font appel à des motifs dont l'origine est très ancienne et sont rattachés aux pliages traditionnels en origami. Par ailleurs, ces motifs sont aussi très utilisés par les plisseurs de tissus (Voir les Ateliers Lognon à Paris). Ceux-ci utilisent des moules en carton (Figure 2.1) pour étuver des tissus utilisés dans la haute couture (Figure 2.2).

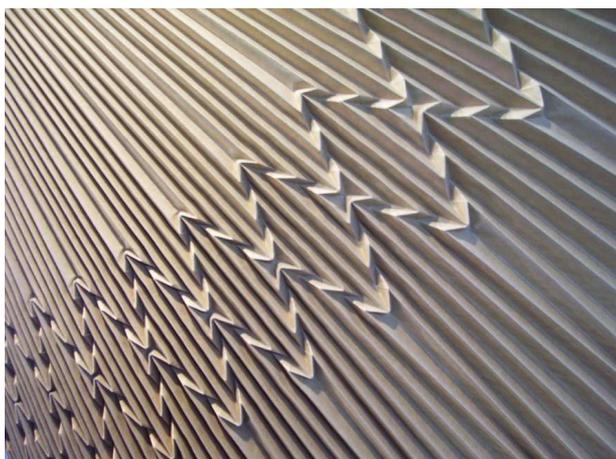


Figure 2.1 – Un moule utilisé pour le plissage des tissus (Sid, 2009)



Figure 2.2 – Une robe réalisée avec un tissu plissé (Lognon, 2010)

Bien qu'il semble y avoir une très grande variété de motifs possibles, les origamis doivent respecter certaines règles géométriques. En effet, il est bien connu qu'une feuille de papier peut être assimilée à une surface développable car elle est pratiquement inextensible dans son plan en comparaison de sa faible raideur en flexion (Cerde and Mahadevan, 2005). Ainsi, lorsqu'on plie une feuille, on ne fait qu'introduire des singularités de courbure localisées au niveau du pli. La surface engendrée demeure une surface développable. On dit alors que la feuille est isométrique au plan. Le fait de se limiter au pli et de s'interdire toute coupure de la feuille n'est donc pas sans contrainte. Il existe un certain nombre de résultats formalisant les conditions de pliabilité. Dans le cas de pliages à plat, quelques théorèmes fixant des règles de pliabilité sont rappelés en Encadré 2.1. Ces conditions locales de refermeture à chaque intersection de plis ne sont pas suffisantes pour garantir la refermeture de l'ensemble de la feuille. En réalité, savoir s'il est possible de replier une feuille en partant d'un dessin des plis à plat (crease pattern) vérifiant les conditions locales de refermeture est un problème ouvert (Demaine and Demaine, 2001). Plus récemment dans cette thématique, Tachi (2009) s'est intéressé à la cinématique d'ensemble de pliages complexes. Dans le cas des pliages tridimensionnels, on rappellera les travaux de Duncan and Duncan (1982) sur la cinématique des plis courbes, illustrant la nécessité d'employer la géométrie différentielle pour décrire correctement

2.1. LES PLIAGES STRUCTURELS PÉRIODIQUES

Théorème de Maekawa : Lorsqu'on déplie un origami, on observe des plis "montagne" et des plis "vallée". Dans le cas des pliages plans, à l'intersection de différents plis (un sommet), la différence entre le nombre de plis montagne et de plis vallée vaut toujours 2.

Théorème de Kawasaki (Kawasaki (1989)) : Soit la suite des angles a_1, a_2, \dots, a_{2n} autour d'un sommet (il y a toujours un nombre pair d'angles autour d'un sommet). L'addition d'un angle sur deux est égale à π :

$$a_1 + a_3 + \dots + a_{2n-1} = \pi \quad \text{ou} \quad a_2 + a_4 + \dots + a_{2n} = \pi$$

Encadré 2.1: Théorèmes d'origami

les déformations acceptables par pliage. Enfin, des techniques systématiques pour générer de tels motifs ont été proposées par Kling (1997, 2005) et sont présentées en Figure 2.3. Parmi ces nombreux motifs, le plus connu de tous est le *module à chevrons* (*chevron pattern*). Ce pliage est aussi connu sous le nom de *Miura-Ori* (littéralement : origami de Miura, en hommage à un de ses fervents promoteurs, Koryo Miura) ainsi que *herringbone-pleating* et enfin *Zeta-Core* (nom donné au pliage par Miura lui-même (Miura, 1972)).

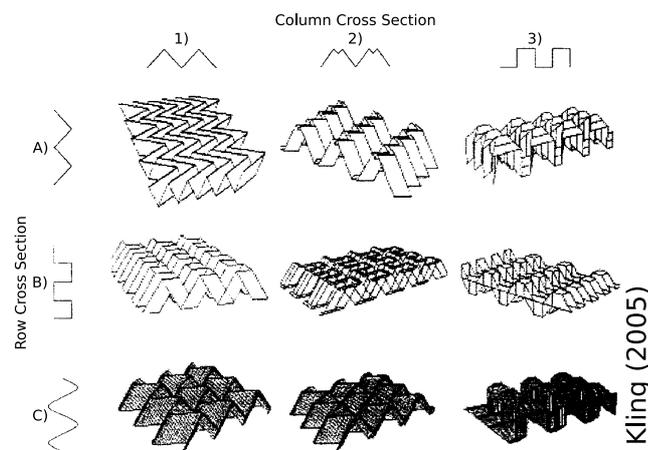


Figure 2.3 – Motif générés par la théorie de Kling

Le module à chevrons est un motif extrêmement simple, dont la maille élémentaire est constituée de quatre parallélogrammes identiques (Figure 2.4). Le paramétrage complet du motif est donné au Chapitre 3. Un des compétiteurs du module à chevrons envisagé sérieusement est le motif nommé *Matted* (Figure 2.5). Ce motif est légèrement plus complexe et semblerait offrir une plus grande résistance. Cependant, notre cadre d'étude se restreindra au module à chevrons qui est le plus simple à modéliser.

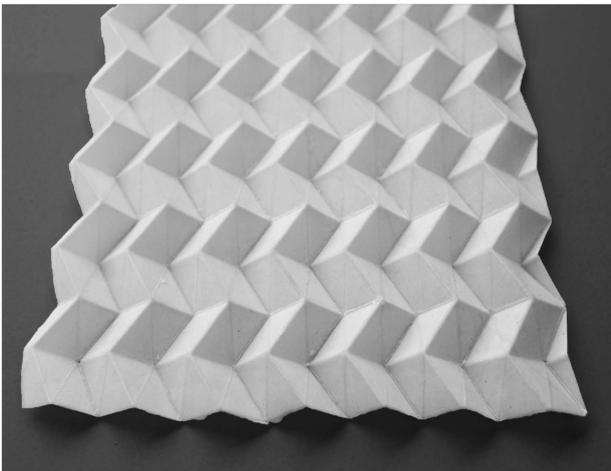


Figure 2.4 – Le module à chevrons

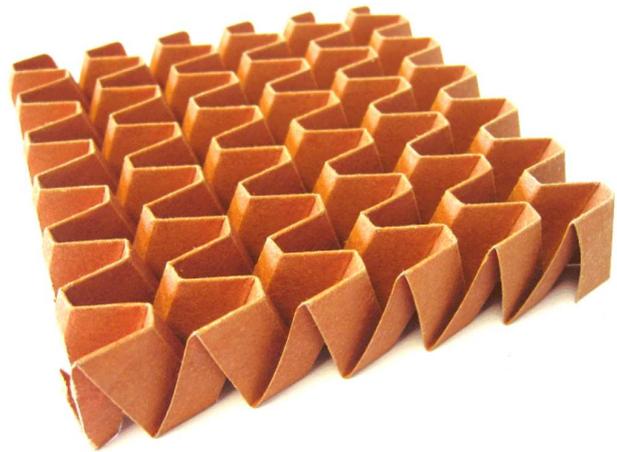


Figure 2.5 – Le motif Matted (Heimbs, 2009)

2.1.2 Les applications possibles

On peut recenser un nombre important d'applications possibles pour ces motifs. En voici une liste non exhaustive pour le module à chevrons.

- *Absorbeur de chocs* : des études montrent que le module à chevrons présente de bonnes caractéristiques pour être utilisé comme absorbeur de chocs (Basily and Elsayed, 2004b). On peut donc envisager de l'employer dans les emballages ou comme absorbeur de choc pour le parachutage de matériel.
- *Échangeur double flux* : comme le module à chevrons est une feuille sans coupure, il sépare deux domaines bien définis. Il est possible de faire circuler séparément deux fluides caloporteurs à contre courant (Figure 2.6). Ainsi le module à chevrons est un bon candidat pour des échangeurs double-flux efficaces et économes à fabriquer. Pour obtenir de bons échangeurs de chaleur, il faut être capable non seulement de concentrer une grande surface dans un petit volume, mais aussi de bien mélanger chaque fluide au cours de l'échange. Le module à chevrons présente une grande surface spécifique et sa forme ondulée facilite la création de tourbillons ce qui lui confère de bonnes capacités d'échange. Les travaux de Zhang et al. (2004) sur un motif apparenté au module à chevrons illustrent ce potentiel.
- *Revêtement* : le relief donné à une feuille métallique par le module à chevrons lui donne une plus grande inertie dans les deux directions principales de flexion. On peut donc envisager des applications similaires à la tôle ondulée et au bardage. De plus, les qualités esthétiques et de formabilité du module à chevrons peuvent en faire un matériau apprécié des architectes et des designers.
- *Âme de panneau sandwich* : C'est cette application qui fait l'objet de ce travail. Une présentation détaillée des panneaux sandwichs est l'objet de la section qui suit.

2.2. LE MARCHÉ DES PANNEAUX SANDWICHS ET SES EXIGENCES

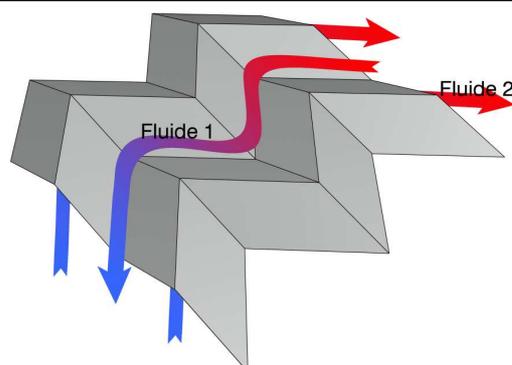


Figure 2.6 – Le fonctionnement en échangeur double flux du module à chevrons

On peut constater que la simple maîtrise d'un procédé de fabrication du motif présente déjà un intérêt à moyen terme. Il est clair que ce motif n'est pas une solution techniquement optimale pour toutes ces applications. Cependant, si le coût de fabrication de ce produit intermédiaire est très modique, il pourrait trouver des débouchés dans des domaines inattendus. Comme on souhaite utiliser le module à chevrons comme âme de panneau sandwich, on propose donc d'analyser les contraintes de ce marché.

2.2 Le marché des panneaux sandwichs et ses exigences

L'idée de prendre en sandwich un matériau léger et peu résistant entre deux couches d'un matériau noble afin d'obtenir une plaque plus résistante et plus raide en flexion à poids donné est assez ancienne. Certains la font remonter à Léonard de Vinci, d'autres au pont tubulaire sur la rivière Conwy au Royaume-Uni de Sir W. Fairbairn 1849 (Allen, 1969) et enfin certains voient dans la structure poreuse des os du crâne un exemple intemporel (Thompson, 1917; Gibson and Ashby, 1988). Aujourd'hui ce concept multiforme peut être regroupé sous la notion de panneau sandwich. Les deux couches de matériau noble sont généralement assez minces et sont appelées les peaux (skins). La couche "tendre" est appelée âme (core) en référence à l'âme des poutres profilées en I (Figure 2.7). Il est communément admis que cet agencement de la matière est optimal pour maximiser la raideur en flexion d'une plaque, à poids et gabarit donné (Laszczyk, 2010).

Le premier champ d'application dans lequel la question du poids s'est posée sérieusement est l'aéronautique et la première application industrielle reconnue est l'utilisation de panneaux sandwichs composés de contreplaqué pour les peaux et de balsa pour l'âme dans le fuselage d'un avion de combat Britannique lors de la seconde Guerre Mondiale, le De Havilland Mosquito. Aujourd'hui, les panneaux sandwichs sont des structures qui se retrouvent dans de nombreuses applications. Le plus répandu des panneaux sandwichs est le carton ondulé (Figure 2.8) qui consiste à coller entre deux feuilles de papier kraft, une feuille ondulée en guise d'âme. Les panneaux sandwichs sont aussi

CHAPITRE 2. CAS D'ÉTUDE : LES PANNEAUX SANDWICH À ÂME PLIÉE

répandus dans la construction comme panneaux d'isolation (Figure 2.9), éléments de cloisons et de mobilier (Portes Isoplanes). Enfin, leur excellente capacité structurelle rapportée à leur poids en font un matériau roi dans l'aéronautique et l'aérospatiale (Figure 2.10).

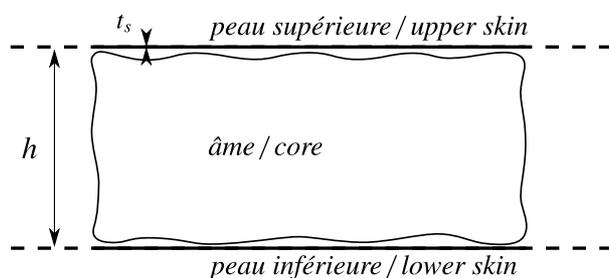


Figure 2.7 – Modèle de tri-couche à peaux minces.

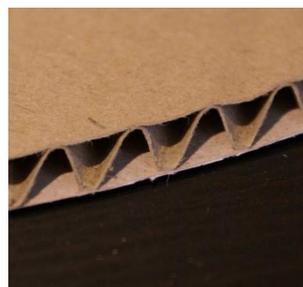


Figure 2.8 – Du carton ondulé double face

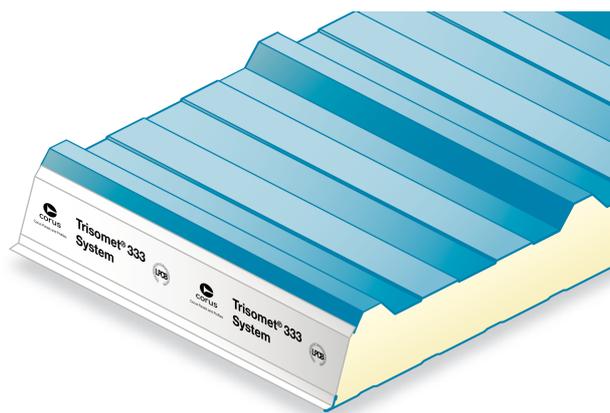


Figure 2.9 – Un panneau isolant formé de peaux en acier et d'une âme en polyuréthane (Corus, 2010)

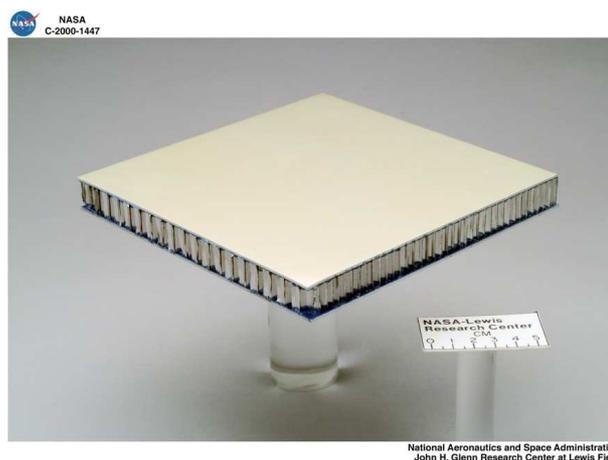


Figure 2.10 – Un panneau sandwich de très haute qualité structurelle en nid d'abeilles aluminium et peaux en aluminium (Glenn, 2000)

2.2.1 Le marché des panneaux sandwichs aujourd'hui

Comme on l'a déjà indiqué, c'est l'aéronautique qui a été la première à pousser les recherches sur ce sujet. En effet, actuellement on estime le coût d'un excès de poids à la conception sur la durée de vie complète d'un avion civil à plus de 1000€/kg. Aujourd'hui, le spectre d'application des panneaux sandwichs s'est considérablement élargi. Ainsi, si on souhaite identifier les applications pertinentes pour un nouveau type d'âme il est nécessaire de connaître la structure des marchés sous-jacents. Ceux-ci s'organisent essentiellement autour d'un arbitrage très sévère entre le coût de

2.2. LE MARCHÉ DES PANNEAUX SANDWICHS ET SES EXIGENCES

fabrication et la capacité structurelle. Les panneaux sandwichs à hautes capacités structurelles se retrouvent dans l'aérospatiale. *A contrario*, on peut chercher à minimiser le plus possible le coût en gardant des capacités structurelles convenables. Le carton ondulé illustre un tel compromis.

La capacité structurelle rapportée au coût du produit final s'articule autour de trois critères. Le premier est le choix du matériau des peaux et de l'âme. Ce choix varie des métaux et des matériaux fibrés (fibre de carbone, de verre, d'aramide), pour les plus onéreux, aux plastiques thermoformables (polypropylène par ex.) et les différents types de papier, pour les moins chers. On notera aussi l'emploi déjà évoqué du balsa et du bois (dans les portes isoplanes par exemple) comme matériau noble ainsi que les mousses polymères, telles que le polyuréthane, prises en sandwich avec des tôles d'acier dans les panneaux isolants utilisés dans les hangars industriels. D'une manière plus générale et si l'on souhaite avoir une approche systématique, on peut se référer aux travaux d'Ashby sur les stratégies de choix d'un matériau (Ashby, 2000). Dans le cas présent, les rapports E/ρ , $E^{1/3}/\rho$, et σ^0/ρ face au prix jouent un rôle déterminant dans ce choix. E est le module d'Young, σ^0 la résistance ultime à la traction, ρ la masse volumique.

Le second critère est bien connu, c'est la taille du marché et les rendements d'échelle. En effet, moyennant un investissement initial conséquent, il est envisageable de produire rapidement un produit de qualité. La viabilité économique du produit réside donc sur la possibilité d'amortir rapidement l'investissement et donc sur la taille du marché accessible. Ce raisonnement fonctionne pour le carton ondulé qui a des capacités structurelles assez remarquables pour un coût très modique car la taille du marché est considérable. Dans le cas du nid d'abeilles en aluminium destiné à l'aérospatiale, la taille du marché mondial est tellement petite qu'elle ne permet pas d'amortir un investissement dans une machine industrielle de l'ordre de 500k€ sur 5 ans. Même dans ce cas plus de 50% du prix de fabrication serait dédié à l'amortissement de la machine ce qui est un frein considérable à l'entrée de nouveaux acteurs sur le marché (étude réalisée à titre privé par des étudiants de master à l'université Paris Dauphine).

Le troisième critère est le choix de la géométrie d'âme, intimement lié à la cadence de fabrication accessible et au choix du matériau. Outre un remplissage complet entre les peaux avec une mousse ou du balsa, de nombreuses formes structurées ont été utilisées. La plus connue est le nid d'abeille, mais de nombreux types de gaufrage ont aussi été produits (voir Miura (1972) par exemple). Une mousse est très facile à injecter entre deux peaux alors que produire une forme structurée est inévitablement plus délicat. Par exemple, les procédés utilisés dans l'aérospatiale avec les nids d'abeilles métalliques peuvent être presque qualifiés d'artisans : procédé de fabrication du nid d'abeilles par collage feuille par feuille, table d'expansion du nid d'abeilles etc., ce qui a une incidence directe sur le coût de fabrication. Ainsi une des sources principales d'innovation dans le domaine réside dans la recherche de nouvelles géométries d'âme ainsi que des procédés de fabrication moins onéreux. De très nombreuses propositions ont été faites en variant les matériaux, les

géométries, etc. Deux solutions se démarquent aujourd'hui. D'une part, les âmes en treillis ("truss core") font l'objet recherches financées en partie par le ministère de la défense américain pour des raisons balistiques (Wicks and Hutchinson, 2001; Wadley, 2002; Cote et al., 2007; Doherty et al., 2009). Ces géométries sont probablement celles qui offrent la plus grande résistance à l'effort tranchant à poids fixé, mais elles restent pour l'instant difficiles à produire. D'autre part, les âmes pliées présentent la possibilité d'être fabriquées en continu à partir de techniques de pliage ce qui pourrait leur donner un avantage concurrentiel par rapport au nid d'abeilles.

Ainsi, comme on peut le voir, les panneaux sandwichs sont omniprésents dans la vie courante. C'est une technologie qui est relativement jeune et qui bénéficie encore d'un processus de démocratisation : la baisse régulière des coûts de fabrication permet l'accès à de nouveaux marchés sous réserve de se plier au compromis capacité structurelle/prix de fabrication imposé par ceux-ci. Ce processus peut offrir des opportunités à de nouveaux matériaux d'autant plus que les marchés eux-mêmes sont en forte évolution. En effet, outre le raisonnement comptable sur l'économie de matière offerte par les panneaux sandwichs, la question d'une utilisation raisonnée des ressources est devenue un enjeu de société qui nécessairement ouvre la voie à de nouvelles applications.

2.2.2 Les enjeux structurels des panneaux sandwichs

Les panneaux sandwichs ont donc un comportement structurel bien meilleur que celui d'une plaque massive. La contrepartie de cette amélioration est une complexification importante du comportement mécanique de ces objets comme on l'a déjà évoqué au chapitre précédent. Étant donné que la capacité structurelle est un élément déterminant pour les applications utilisant des panneaux sandwichs, la connaissance et la prédiction du comportement d'un panneau est un enjeu important. On propose ici une introduction au comportement mécanique simplifié des panneaux sandwichs couramment utilisés dans leurs applications.

En effet, même si on a vu que le comportement d'une plaque périodique hétérogène est aujourd'hui un problème ouvert, le fait que les peaux soient beaucoup plus raides que l'âme permet une décomposition des rôles mécaniques de l'âme et des peaux. Cette décomposition n'est possible qu'au prix d'une hypothèse de contraste qui n'est pas toujours formalisée. Une exploration quantitative de cette question sera effectuée au Chapitre 6 et sera appliquée aux panneaux sandwichs à âme en module à chevrons au Chapitre 7. Pour l'instant, on accepte cette hypothèse sans justification.

Dans le cadre de l'hypothèse de contraste, la raideur et la résistance de la plaque en flexion sont assurées essentiellement par les peaux. En effet la mise en flexion d'un panneau sandwich génère un effort de traction/compression dans les peaux alors que l'âme, étant plus souple, n'est soumise pratiquement à aucun effort (Figure 2.11). La déformation générée par l'effort tranchant est, quant à elle, liée à la mise en cisaillement de l'âme dans toute son épaisseur. Ainsi la raideur et la résistance à l'effort tranchant sont assurées essentiellement par l'âme (Figure 2.12).

2.3. COMMENT FABRIQUER DES ÂMES PLIÉES

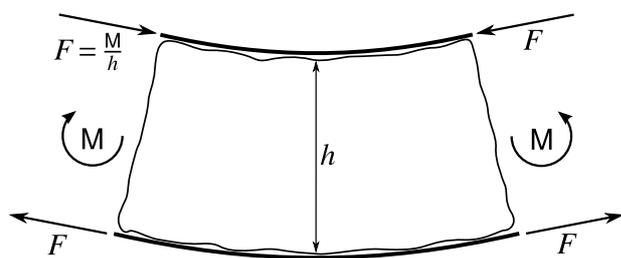


Figure 2.11 – Effet de la flexion sur les peaux

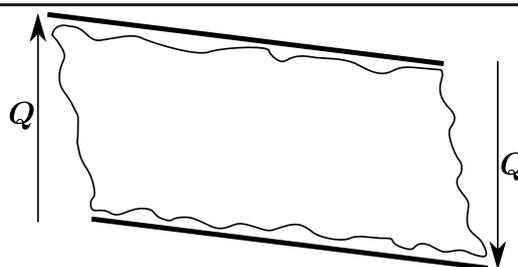


Figure 2.12 – Effet de l'effort tranchant sur l'âme

Puisqu'on cherche à comparer le module à chevrons utilisé comme âme de panneau sandwich, c'est l'étude de la raideur et de la résistance à l'effort tranchant qui sont pertinentes. Comme on l'a déjà indiqué, la flèche de cisaillement peut devenir prépondérante dans le cas des panneaux sandwichs. Mais plus encore, lorsqu'on s'intéresse à la résistance, il est absolument nécessaire de connaître précisément les efforts locaux générés par l'effort tranchant.

En effet, pour la plupart des chargements conventionnels, la ruine d'un panneau sandwich se produit par instabilité élastique. Le nombre de types de ruine observé est assez grand, allant du flambement d'ensemble au micro-voilement des facettes qui constituent l'âme. A titre d'illustration, une étude détaillée dans le cas de panneaux sandwichs à âme en nid d'abeilles est proposée par Petras and Sutcliffe (1999) mais aussi par Rammerstorfer et al. (2006). Pour le comportement en grande transformations du nid d'abeilles seul on pourra aussi se référer aux travaux de Wierzbicki (1983) et Mohr and Doyoyo (2004). Cette observation mène à deux conclusions. La première est qu'il est essentiel d'avoir une connaissance détaillée et suffisamment exacte du comportement élastique pour estimer correctement le point de bifurcation. La seconde conclusion est que la qualité géométrique de l'âme qui est produite est cruciale pour obtenir des performance structurelles acceptables. Ainsi, la résistance d'une géométrie donnée dépend fondamentalement du procédé qui a été utilisé pour la produire. Cette observation explique donc l'arbitrage sévère entre prix et capacité structurelle qui fait la spécificité du marché des panneaux sandwichs. Une revue des procédés de fabrication du module à chevrons existants s'avère donc nécessaire.

2.3 Comment fabriquer des âmes pliées

Comme nous l'avons montré en Section 2.2.1, il existe un compromis entre le coût de fabrication et la capacité structurelle du motif. Ainsi, soit on vise un marché petit et ayant de fortes attentes structurelles avec un procédé quasi artisanal ; soit on vise un marché très grand, pour lequel on doit être capable de fournir à haute cadence avec des rendements d'échelles conséquents (auxquels s'ajoute un coût d'entrée élevé). Jusqu'à récemment la fabrication des âmes pliées a posé

trop de problèmes soit du côté de la qualité structurelle soit du côté de la vitesse de fabrication pour qu'elles s'imposent vraiment comme le matériau d'avenir pour les âmes de panneau sandwich. En effet, le module à chevrons a beau être un pliage, il n'est pas du tout évident de le produire à l'échelle industrielle.

A priori on peut envisager deux approches pour fabriquer en continu le module à chevrons. La première serait de le produire uniquement par des techniques de pliage. L'avantage de cette approche est que le pliage est fondamentalement peu coûteux en énergie et n'endommage le matériau que sur une surface limitée à la zone de pli. On s'attendrait donc à avoir un produit fini de bonne qualité avec une telle méthode. Malheureusement une telle approche est impossible au premier abord. La raison principale à cela est qu'on ne peut produire le module à chevrons en faisant une suite simple de pli élémentaires mais qu'il faut imposer sa forme "d'un seul coup" à la feuille (on parle de pli complexe). Une deuxième approche viserait à estamper directement la feuille à mettre en forme (pressage entre deux outils gaufrés). De nouveau, une telle approche n'est pas applicable. Pour avoir une capacité structurelle raisonnable, le matériau ne doit pas être trop endommagé au cours du procédé. Or les géométries qui présentent un intérêt structurel ont un relief tel qu'il faudrait étirer la feuille dans son plan d'un facteur trois ou quatre.

On se propose ici de donner un état de l'art non exhaustif tournant autour de cette thématique qui est à la fois ancienne et a connu plusieurs foyers d'innovation.

2.3.1 Quelques exemples anciens

Il existe un corpus assez ancien de brevets portant sur une très grande variété de gaufrage du papier, remontant sans problème à la seconde moitié du XIX^{ème} siècle. Une première phase de développements technologiques autour des âmes pliées a démarré dans les années 50 en même temps que l'on s'intéressait de plus près au nid d'abeilles (Kelsey et al., 1958). Ainsi le premier brevet portant sur l'usage du module à chevrons comme âme de panneau sandwich est à ma connaissance celui déposé par Rapp (1960) illustré Figure 2.13. Cependant il n'est pas exclu qu'il y ait des antériorités car à la même époque, il existait déjà des tentatives de production du module à chevrons. Ainsi Hochfeld (1959) propose un procédé itératif présenté Figure 2.14. Il est rapidement suivi par Gewiss qui fera deux propositions de machine. Une première machine "pas à pas" (Gewiss, 1960, 1969b,a, 1976) illustrée Figure 2.15, puis une seconde machine permettant probablement une production presque continue du module à chevrons (Gewiss, 1968, 1977). Cette analyse ne se base que sur les brevets publiés. Il est donc difficile de donner une raison précise sur l'absence de généralisation des âmes pliées dans l'industrie à cette époque. Ceci étant dit, vu la complexité des machines proposées et le fait qu'elles présentent des mécanismes plus ou moins itératifs laisse à penser que leurs cadences n'étaient pas suffisantes.

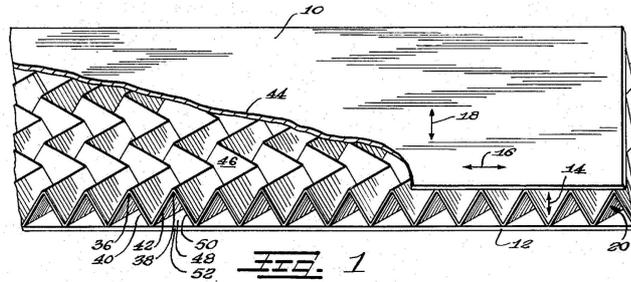


Figure 2.13 – Brevet sur le concept de panneau sandwich incluant le module à chevrons (Rapp, 1960).

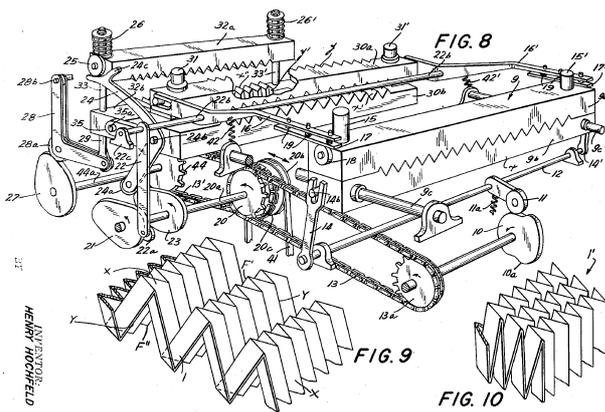


Figure 2.14 – Machine itérative proposée par Hochfeld (1959)

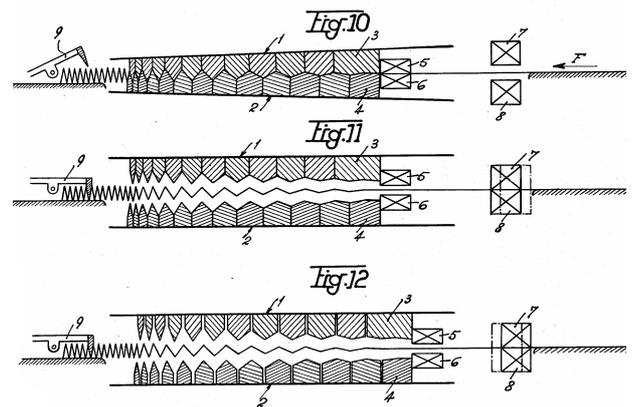


Figure 2.15 – Machine itérative proposée par Gewiss (1976)

2.3.2 Koryo Miura

Parallèlement à ces développements en Europe et aux États-Unis, le sujet émerge aussi au Japon avec Miura qui est aujourd'hui Professeur émérite à l'université de Tokyo et s'est intéressé essentiellement à l'aérospatiale. Il a été le premier à formaliser l'étude du module à chevron. Il a en particulier calculé analytiquement la borne supérieure de la raideur transverse du module à chevrons (Miura, 1972) (voir Chapitre 3). En ce qui concerne la fabrication du module à chevrons, bien que conscient des difficultés il ne semble pas que Miura se soit penché de manière approfondie sur la question. Deux approches sont proposées dans ses travaux. Une première proposition (Miura, 1972) consiste à directement estamper le motif, avec les limitations que l'on a indiquées. Le résultat est présenté Figure 2.16. En regardant de près on peut constater que la géométrie du motif est assez approximative ce qui ne laisse pas présager de capacités structurelles suffisantes. Une deuxième proposition (Miura, 1980) consiste à mouler le motif avec un polymère (Figure 2.17). Malheureusement le moulage ne se prête pas du tout à une production en continu. Il semble que Miura n'a pas persévéré sur l'emploi du module à chevrons comme âme de panneau sandwich mais qu'il se soit intéressé par la suite à ses propriétés cinématiques. Ces propriétés ne seront pas détaillées ici. On indiquera seulement que le module à chevrons a inspiré la cinématique de déploiement de panneaux solaires ainsi qu'une nouvelle technique pour plier les cartes (Miura, 1994).

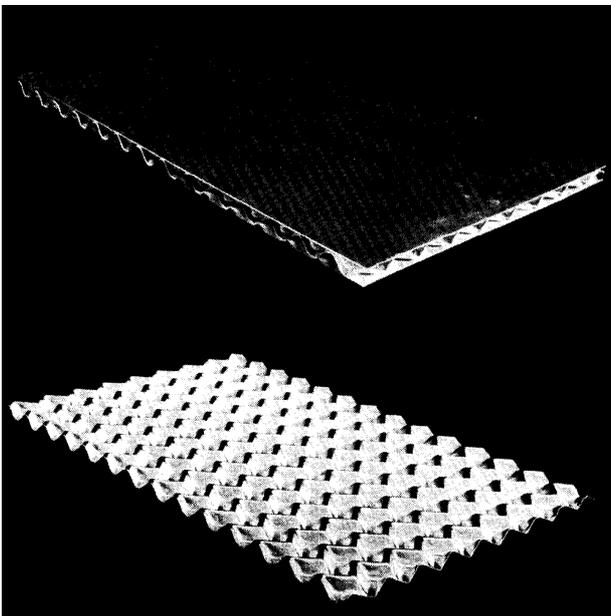


Figure 2.16 – Un panneau sandwich incluant le module à chevrons présenté par Miura (1972)

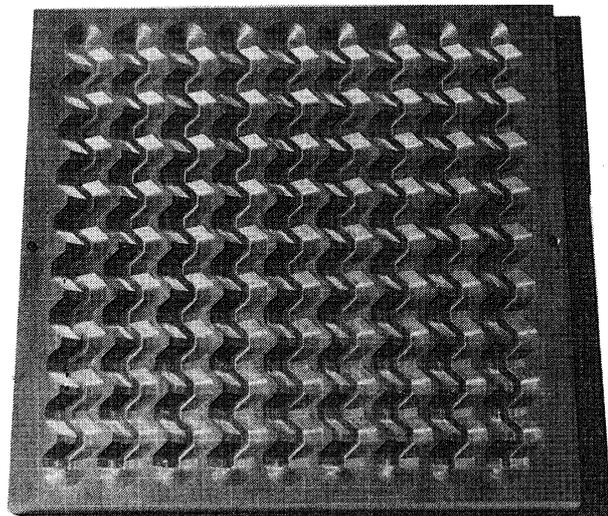


Figure 2.17 – Moule utilisé par Miura pour réaliser le module à chevrons (Miura, 1980)

2.3. COMMENT FABRIQUER DES ÂMES PLIÉES

2.3.3 Université de Kazan

Selon toute vraisemblance, l'université de Kazan (Russie) a travaillé dans le courant des années 70 sur le module à chevrons. Malheureusement il existe très peu de documentation d'époque à ce sujet. Certains auteurs (Nguyen et al., 2005a; Kintscher et al., 2007) indiquent qu'il a été envisagé d'utiliser le module à chevrons dans l'aéronautique mais aussi dans l'industrie pétrolière pour des raisons acoustiques. Plus récemment on trouve des articles publiés dans la revue Russian Aeronautics avec une orientation essentiellement technologique (Khaliulin, 1999, 2005; Khaliulin et al., 2005; Khaliulin and Batrakov, 2005, 2006; Zakirov and Alekseyev, 2005; Zakirov et al., 2006, 2008; Kayumov et al., 2007; Movchan, 2007). De plus de nombreux brevets ont été déposés en collaboration avec Airbus Deutschland (Akishev et al., 2005b,a; Akishev and Zakirov, 2005b,d,a,e,c).

Le procédé étudié à l'université de Kazan utilise des techniques d'hydroformage avec des moules déformables pour accompagner la refermeture du module à chevrons lors de sa mise en forme par pliage (Figure 2.18). Ce procédé permet en particulier de mettre en forme des composites à fibres de carbone, préimprégnés de résine époxy, connus pour être particulièrement difficiles à plier (très fort retour élastique). Cependant, la précision de réalisation est limitée par la qualité du moule déformable utilisé et il s'agit de nouveau d'un procédé à la pièce.

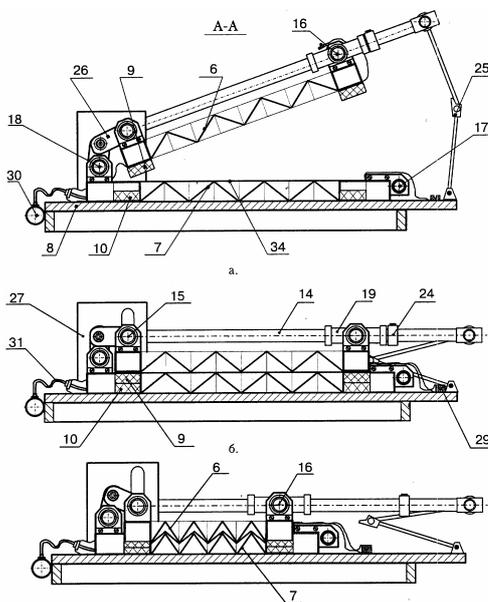


Figure 2.18 – Hydroformage avec moule déformable (Akishev et al., 2005a)

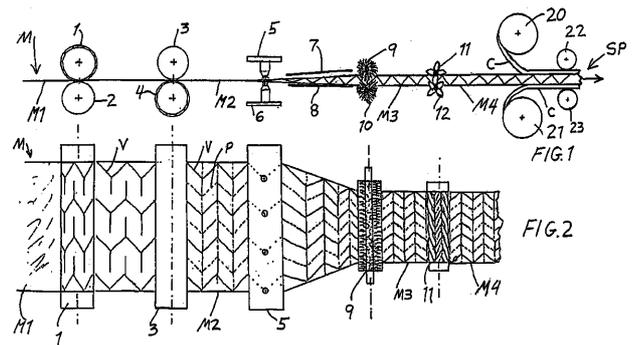


Figure 2.19 – Exemple d'emploi des panneaux produits par Foldcore (Kehrlé, 2004)

2.3.4 Foldcore

L'entreprise **Foldcore** est une spin-off de l'université de Stuttgart dirigée par Dr-ing. Reiner Kehrlé. Elle dispose d'une machine brevetée (Kehrlé, 2004, 2009, 2010) présentée en Figure 2.19, permettant de produire en continu différents motifs d'âmes pliées. Le procédé consiste à effectuer un estampage léger du motif, voire de réaliser de légères incisions avec des outils rotatifs, pour amorcer le repliement. Ensuite, la refermeture est forcée dans le plan du motif avec éventuellement un chauffage (dans le cas des plastiques thermoformables). Les matériaux employés vont du papier aux métaux en passant par les plastiques thermoformables et le Nomex[®]. Le Nomex[®] est un papier de fibres d'aramides très couramment utilisé pour fabriquer des nid d'abeilles dans l'aviation civile. C'est une marque déposée par DuPont. Contrairement à la technologie développée à Kazan, il n'est probablement pas possible de mettre en forme des fibres de carbone préimprégnées. Enfin, il ne semble pas y avoir de limitation intrinsèque de cadence. Foldcore est aujourd'hui une des entreprises les plus avancées autour de ces technologies.

2.3.5 Le programme Celpact

Le programme **CELPACT** (Cellular Structures for Impact Performance) rassemble partenaires industriels et scientifiques autour de l'étude de nouvelles structures sandwich. C'est un programme subventionné par la Commission Européenne à travers l'organisme European Aeronautics Science Network (N°AST5-CT-26-031038).

Le programme vise à étudier quantitativement des solutions concurrentes du nid d'abeilles (Herrmann et al., 2005). Le nid d'abeilles en Nomex[®] est en effet considéré comme trop cher à fabriquer. De plus, comme les cellules du nid d'abeilles sont fermées, un nouveau type de dommage caché est apparu. L'enchaînement des décollages et atterrissages provoque l'accumulation de condensation dans les cellules. L'eau finit par faire moisir le nid d'abeilles ce qui provoque des délaminages intempestifs. Ces deux raisons principales poussent donc à considérer de nouvelles structures dont les âmes pliées car elles sont ventilables (voir remarque sur l'application en échangeur de chaleur du module à chevrons, Section 2.1.2).

Le partenaire industriel moteur est EADS, représenté par Airbus Deutschland qui possède la propriété industrielle de la technologie développée à Kazan, mais on y retrouve aussi l'entreprise Foldcore. L'objectif est de comparer les capacités structurelles des deux types de produits et plus particulièrement la résistance aux chocs.

Du point de vue scientifique le programme regroupe sept institutions. On retiendra EADS Innovation Works, le Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt et le LMT de l'ENS Cachan car ils ont travaillé de plus près sur les âmes pliées. Un certain nombre de publications sont sorties récemment et d'autres sont probablement à venir. L'orientation globale de ces travaux est de mettre en place des

2.3. COMMENT FABRIQUER DES ÂMES PLIÉES

techniques de simulation numérique reproduisant le plus fidèlement le comportement des âmes pliées et du nid d'abeilles en incluant les non-linéarités de toutes origines ainsi que des comportements endommageants pour fitter au mieux les courbes expérimentales. ("virtual materials" : (Heimbs et al., 2006, 2007, 2010; Heimbs, 2009; Nguyen et al., 2005a; Kintscher et al., 2007; Fischer et al., 2009; Baranger et al., 2010)). Mise à part l'étude de la résistance aux impacts, ces travaux très utiles pour la conception de ces nouveaux panneaux sandwichs s'intéressent tous à l'âme prise isolément, sans tenir compte de possibles interactions avec les peaux.

2.3.6 Rutgers University

L'université de Rutgers dans le New Jersey aux Etats-Unis travaille aussi indépendamment sur le sujet. Initialement une équipe formée par Basily, Elsayed et Kling a collaboré autour de la conception d'une machine brevetée Basily et al. (2006); Basily and Elsayed (2007) produisant en continu les âmes pliées. Basily and Elsayed ont travaillé sur la réalisation de la machine qui met en forme du papier et des métaux (Figure 2.20). Cependant, il semblerait que le produit fini soit de moins bonne qualité structurelle que celui proposé par Foldcore et que le procédé ne s'applique ni au Nomex[®], ni aux fibres de carbone. Les applications citées sont d'ailleurs le packaging, les absorbeurs de chocs (Figure 2.21) et les échangeurs de chaleur (Figure 2.22), (Basily and Elsayed, 2004a,b; El-Sawi et al., 2010).

De son côté, Kling a travaillé sur la génération de motifs pliable présentée en Section 2.1.1 Kling (2005) et a créé sa société **Folded Structures** portant sur ces thématiques.



Figure 2.20 – La machine développée à l'université de Rutgers (Basily and Elsayed, 2004a)



Figure 2.21 – Étude sur les capacités d'absorption des chocs réalisée par Basily and Elsayed (2004b)



Figure 2.22 – Les panneaux solaires thermiques développés à l'université de Rutgers (El-Sawi et al., 2010)

2.4 Discussion

Comme on peut le voir, l'intérêt pour le module à chevrons et plus généralement les âmes pliées est assez ancien et a connu plusieurs foyers d'innovation (France, Japon, Russie, États-Unis). Ce constat impose immédiatement de s'interroger sur la raison pour laquelle ce type d'âme ne s'est pas répandu largement. En premier lieu, il n'est pas évident *a priori* de savoir si le module à chevrons est plus performant d'un point de vue structurel. En effet, la plupart des essais ont eu lieu avec des méthodes de fabrication relativement artisanales et on ne peut savoir si c'est un manque de qualité dans la réalisation ou un problème inhérent à la géométrie du motif qui fait que ces expériences n'ont pas été concluantes. En second lieu, il peut tout simplement s'agir d'un problème de marché. Dans le cas d'une application de masse, il y a un coût d'entrée conséquent, qui n'a peut-être pas été surmonté jusqu'ici. Dans le cas de marchés de niche, peut-être que les investissements requis pour obtenir un produit de meilleure qualité structurelle sont trop grands en proportion des ventes potentielles.

Aujourd'hui, ce constat semble remis en cause puisqu'un industriel de taille (EADS) s'intéresse à ce motif. De plus, comme on l'a déjà évoqué, la démocratisation des panneaux sandwichs permet d'imaginer qu'il va apparaître de nouveaux marchés dans lesquels les âmes pliées seront pertinentes. On pense en premier lieu au domaine de la construction où les exigences en matière structurelle sont moins grandes que l'aéronautique mais où les surfaces à produire peuvent très rapidement devenir grandes.

D'un point de vue scientifique, les âmes pliées sont un sujet qui a été essentiellement porté par les industriels et les ingénieurs. Ainsi, aujourd'hui l'ensemble des connaissances reste de l'ordre technologique et peu formalisé, bien que des travaux d'une qualité certaine commencent à émerger. Comme on l'a indiqué, l'évaluation d'une âme de panneau sandwich passe par la maîtrise de son comportement au cisaillement. On se propose donc d'utiliser pour le module à chevrons la toute

2.4. DISCUSSION

première méthode proposée pour estimer la raideur en cisaillement d'un panneau sandwich avec du nid d'abeilles dans le chapitre qui suit (Kelsey et al., 1958).

