

Janvier 2008

LE PLI

« La division du continu ne doit pas être considérée comme celle du sable en grains, mais comme celle d'une feuille de papier ou d'une tunique en plis, de telle façon qu'il puisse y avoir une infinité de plis. », Leibniz.

A. USAGES DU PLI

[PRESENCE DU PLI DANS LA NATURE]

Le pli, processus naturel de Morphogenèse

Le pli revêt maintes fonctions dans l'organisation des êtres et des choses. Il s'agit, selon Jean-Marie Delarue, d'un processus universel de morphogenèse régissant les règnes minéral, végétal et animal.

Partout dans la nature, des formes plissées se constituent harmonieusement, elles sont les résultantes de nombreux facteurs en interaction. La même disposition de plis peut répondre judicieusement à plusieurs fonctions. Le pli dans son rôle structurant, c'est-à-dire rigidifiant par la forme une faible quantité de matière, n'est qu'une fonction parmi d'autres. Sans toutes les énumérer, l'on peut penser au pli comme processus de croissance, de complexification ou comme mécanisme d'éclosion. « Les métamorphoses de l'embryon par exemple, pour engendrer des organes caractérisés, s'accomplissent par replis donnant lieu à des multiples interfaces d'échanges énergétiques, des compactages d'étendues proliférantes, des nervurations consolidatrices, des mécanismes d'éclosion, des replis articulaires mobiles...puis aux rides de la flétriure. »(1)

Le pli se caractérise aussi par son aptitude à la contenance, par la manière dont il donne forme à la matière, il englobe, enveloppe.

Mais plier c'est aussi déplier. Le pli, au moment de sa constitution, par les forces endogènes ou exogènes qu'il implique, se fait aussi mouvement.

Processus de croissance et d'évolution, structuration, multiplication de surfaces d'échange, le pli répond à différents besoins des organismes vivants, et en détermine souvent la forme. Par contre, la matière inorganique subit les plis, résultants d'interactions et de forces extérieures. Deleuze écrit à ce propos dans le Pli, « Un organisme se définit par des plis endogènes, tandis que la matière inorganique a des plis exogènes toujours déterminés du dehors ou par l'entourage ». À l'échelle géologique par exemple, les plissements de l'écorce terrestre sont la trace visible des poussées occasionnées par la dérive des continents. Ces plissements sont le résultat d'une compression de matière et constituent le relief de la terre. Ils sont en quelque sorte les marques du temps. Leur étude revêt un intérêt historique car dans ces plis nous pouvons lire les évolutions morphologiques de la surface terrestre. Les plissements d'une masse, appliqués à une matière en trois dimensions, sont plus complexes à comprendre que des plis appliqués à des surfaces, et ont des caractéristiques bien différentes.

“Matériaux (références, Process, cycles de vie...)”



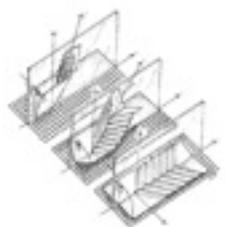
Dans le monde organique, l'économie de matière et donc d'énergie est un principe capital. Le pli est donc extrêmement présent, comme moyen de mise en forme d'une surface. On peut d'ailleurs se demander si la forme engendre les plis ou si c'est le contraire. Morphologie des végétaux et animaux sont indissociables des plis.



[PRESENCE DU PLI DANS LA NATURE]

Monde végétal

Le règne végétal, dont l'observation est une source constante d'émerveillement, présente dans sa grande diversité une panoplie complète et exhaustive des principales fonctions du pli. L'homme, dans ses nombreux essais et réalisations, n'en a pas inventé de nouvelle. C'est donc un domaine d'étude privilégié, qui nous permet à travers un regard nouveau, celui du pliage, de comprendre bien des choses.



Illustrées de the geometry of unfolding tree leaves, H. Kobayashi, B.Kresling and J.F.V. Vincent, Center for Biomimetics, The University of Reading, UK.

Le pli dans sa dimension cinétique est très présent dans la nature. C'est un processus d'adaptation et variation en fonction des besoins, mais aussi de croissance. On peut penser par exemple au processus de croissance d'une feuille. Celle-ci croît tout d'abord dans l'espace restreint du bourgeon ou du germe, c'est la préfoliation. La feuille est disposée dans le bourgeon selon des plis qui lui permettent de tenir dans un minimum de place jusqu'à ce qu'elle soit complète et se déplie à l'air libre. Si déplier est un principe clé du processus de croissance et d'éclosion, certaines feuilles ou fleurs peuvent également se replier sur elles-mêmes. Cela fait alors partie d'un processus d'adaptation aux conditions météorologiques, ou régit les différentes phases de reproduction par exemple.

Dans son rapport de recherche intitulé *Constructions naturelles plissées*, J-M Delarue étudie les principaux rôles du pli dans la nature. « le pliage intervient à chaque stade du développement de la plante (éclosion, croissance, flétrissement, et concerne chaque type d'organe (de manière particulièrement manifeste dans les éléments bidimensionnels externes relativement étendus tel que le limbe des feuilles et des fleurs) ».



Fanage : dessèchement de feuilles, la différence de consistance entre nervures et parois provoque l'apparition des plis.



Effets structurants : Le pli en V, résistance des feuilles longues à la flexion



Modalités d'éclosion, croissance et forme : duplication de la forme par symétrie



Nervation : les plis saillants, vulnérables puisque exposés sont renforcés.



Dispositions embryonnaires : Le pliage assure la transition entre plusieurs états d'occupation de l'espace, les états extrêmes, repliés ou dépliés, ainsi que les phases intermédiaires de transformation.



Boursoufflures : fruits et légumes : les plissements sont dus à des différences de production cellulaires locales, des contraintes superficielles, des tensions centripètes.

Contenance protectrice et imbrication : constitution d'une enveloppe protectrice et imbrication d'éléments par la distribution spatiale que permettent les plis.

Monde animal

Les animaux utilisent entre autres le pli pour ses propriétés cinématiques, notamment afin de s'adapter à différentes situations. Les ailes de la chauve-souris par exemple occupent une surface importante lorsqu'elles sont dépliées, ce qui leur confère la portance nécessaire au vol, et se replient au repos en un volume restreint.



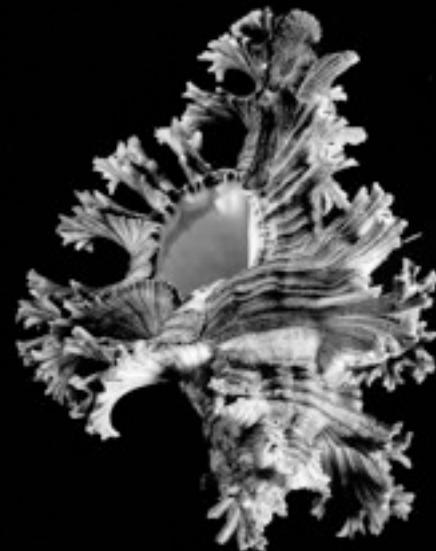
Les coquillages sont intéressants à observer pour les caractéristiques structurales de leur coquille. Ce squelette externe protecteur nous instruit sur différents aspects du travail de coque. "l'efficacité structurale de ces constructions tient à la conjugaison de trois facteurs qui interviennent à des niveaux hiérarchiquement distincts :

- Le travail global de coque, qui tient aux natures, intensité et distributions de courbure (Le convexe et la double courbure inverse étant notablement plus performants que les domaines développables, dont on note l'absence régulière).

- La constitution même du matériau, à l'échelle microscopique (stratifiés cristallins multidirectionnels, tels des contreplaqués qui croisent plusieurs couches de caractéristiques diverses pour en additionner les effets).

- La présence intermédiaires de plis (ou d'ondes qui en constituent une forme atténuée) et dont les effets sont de deux types : nervurations d'inertie localement aménagées ou globalement distribuées, imbrication des ondes qui réalise des engrenages solidarisants."(1)

Ces trois caractéristiques, définissant l'efficacité des coques naturelles, sont à retenir pour la conception du projet qui va suivre. En effet, les courbures de la forme, la constitution des matériaux employés et la distribution des plis seront de première importance, étant donné que cette coque ne sera pas constituée d'un voile de béton, mais d'un assemblage de différents matériaux jouant chacun leur propre rôle.





Les ailes des insectes, extrêmement minces et légères, sont rigidifiées par des plis, qui permettent une meilleure résistance à la flexion et une économie de matière capitale pour des être vivant dont l'existence éphémère est parfois d'une journée à peine.



Les carapaces des insectes, véritables boucliers nervurés, illustrent la fonction structurante du pli appliquée à un matériau composite naturel, la chitine, qui peut être souple ou rigide, voir acéré dans une même continuité de matière (ce que l'on retrouve dans les résines synthétiques)

Les plis et replis sont également constitutifs de l'anatomie interne de certains animaux, comme ici le rat. Les plis permettent de disposer en un volume réduit une grande longueur de "tuyauterie", ainsi que de grandes superficies d'échange entre divers organes.



Lorsqu'il permet d'articuler plusieurs entités, le pli peut revêtir une fonction motrice, c'est par exemple le moyen de locomotion des chenilles.

Le pli est donc compagnon de la mobilité des êtres vivants. Au niveau des articulations, une étendue de membrane importante est nécessaire pour pouvoir évoluer librement dans de nombreuses directions de l'espace. "A moins que le tissu ne soit très élastique, des fronces ou toute autre modalité de variation dans la répartition de la matière s'organisent en plis pour favoriser le libre parcours spatial d'un voile."(1) La peau de l'éléphant par exemple, très dure, est particulièrement plissée aux emplacements fortement sollicités par le mouvement. La présence des plis assure une relative souplesse.



[PRESENCE DU PLI DANS LA NATURE]

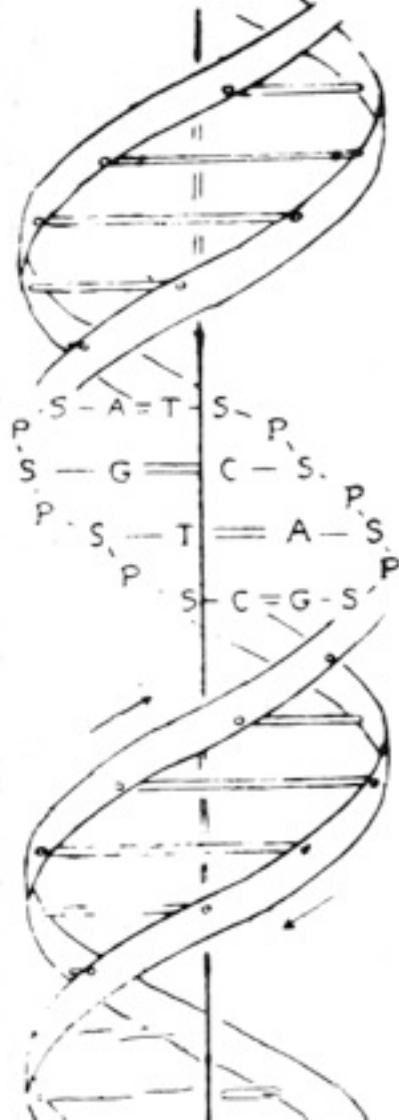
Anatomie humaine

Anatomie externe

Parcequ'il est présent tant à l'extérieur qu'à l'intérieur de notre corps, le pli nous est familier.

Visibles sur notre corps les plis appartiennent à notre identité. On les retrouve, comme chez les animaux, aux emplacements des articulations, permettant la mobilité (les coudes, le cou, les mains, outil mobile et agile par excellence). "Leur distribution reflète à la surface le degré de liberté articulaire interne."(1). Ils sont spécifiques à chaque individu, telles nos empreintes digitales par exemple. Les pli se retrouvent aussi gravés sur notre peau. Ces reliefs constituent une surface antidérapante qui améliore la sensivité de notre toucher.

Les plis sont aussi un des éléments de notre expressivité. "En plus de muscles exclusivement fonctionnels, de nombreux muscles de notre visage n'ont d'autre utilité que cette expressivité."(1) Les expressions de joie, de tristesse, de douleur, sont chez chacun différentes et marquées par un certain nombre de plis, à différents endroit (autour des yeux, de la bouche, sur le front,...). A la longue ils impriment sur le visage le caractère de l'individu, et s'accroissent avec la vieillesse et relâchement de la peau.



ADN : S'il peut contenir une si grande quantité d'informations, c'est qu'il est enroulé sur lui-même, et cela à différentes échelles.



Anatomie interne

L'intérieur de notre corps fait grand usage du pli, qui assure diverses fonctions. Dès notre formation, durant la phase de différenciation des cellules, la prolifération cellulaire engendre des replis qui deviennent le siège des différents organes. De plus, afin d'augmenter la surface d'échange entre deux volumes distincts, la membrane qui les sépare est constituée de multiples replis. Ceci permet d'augmenter la surface d'échange en un minimum d'espace. On peut comparer ce principe au design d'un radiateur à ailettes, qui par ses plis permet une grande surface d'échange, et en améliore le rendement. Les plis se retrouvent aussi aux endroits de passage de substances nutritives, passage momentané, répétitif, et plus ou moins volumineux. Cela nécessite des conduits qui peuvent s'ouvrir et se fermer, se remplir et se vider, selon les besoins. "Le débit nécessite parfois des dilatations considérables ; un dépliage des parois, primitivement repliées, supplée à leur insuffisante élasticité."⁽¹⁾ Présent au plus profond de nous-même, le pli revêt un caractère intime, et parfois nous procure la sensation d'une organisation harmonieuse de la matière.

Intestin grêle : mesurant près de 8 mètres de long, il n'occupe qu'un espace réduit, tellement il est plié et replié sur lui-même.



[RÔLES ET EMPLOI DU PLI DANS LES CRÉATIONS DE L'HOMME]

Esthétique des plis

Ombre et lumières

Le pli, par le jeu des superpositions et des changements de plans, organise un jeu franc ou subtil d'ombres et de lumières.

Dans son livre, "Eloge de l'ombre", le japonais...nous parle de ce qu'est pour lui la beauté dans la culture orientale obscurcir l'obscurité comme source d'émerveillement : "Je crois que le beau n'est pas une substance en soi, mais rien qu'un dessin d'ombres, qu'un jeu de clair-obscur produit par la juxtaposition de substances diverses. De même qu'une pierre phosphorescente qui, placée dans l'obscurité émet un rayonnement, perd, exposée au plein jour, toute sa fascination de joyau précieux, de même le beau perd son existence si l'on supprime les effets d'ombre".

La sensation de beauté que nous procure des plis correctement ordonnés vient directement des jeux d'ombre et de lumière qui rendent la surface animée et changeante. L'ombre insinue une part de mystère en chaque replis, et fait naître alors une dimension poétique en des endroits par eux même insignifiants.



Les rides de cette dune, éphémères et changeantes, sont comme l'expression du temps qui coule.

Expression plastique

Le jeu des drapés est souvent à l'expression corporelle ce qu'est la ride à l'expression du visage, qui trahit l'émotion ou la tension infime de l'âme et dont l'oeuvre est le miroir. C'est peut-être dans le jeu des drapés que le peintre projette sur la toile une réflexion sur la peinture elle-même, une sorte de peinture de la peinture, ou tout simplement parce que le pli, « c'est le plan qui devient volume, la troisième dimension qui surgit de la deuxième, comme sur la surface du tableau, lorsque le clair et l'obscur se font relief et profondeur. »(2)



Le pli peut également engendrer des motifs décoratifs plus ou moins complexes : fractales, pavages et frises,...

De la répétition organisée des plis naît également un sentiment de croissance harmonieuse et réfléchi de la matière dans l'espace.

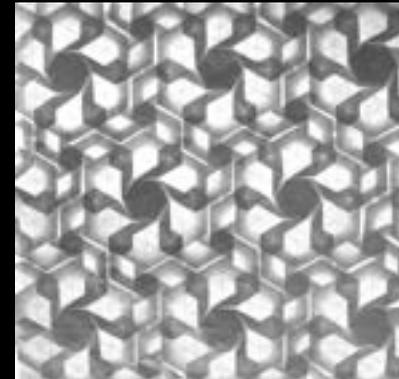


L'origami, l'art du pliage de papier.

L'Origami, ou l'art du pliage de papier, développé au Japon a acquis aujourd'hui une grande reconnaissance dans le monde entier. De véritables artistes faisant preuve d'une grande maîtrise de la géométrie donnent naissance à d'incroyables sculptures tridimensionnelles à partir d'une simple feuille de papier. Cet art ancien et sans cesse renouvelé est aujourd'hui riche d'une très grande variété de figures. De nombreuses disciplines puisent dans ce registre une partie de leur vocabulaire, c'est par exemple le cas de l'architecture mais aussi des nanotechnologies* * (3)

Les liens entre origami et architecture peuvent se situer à différents niveaux. D'un point de vue rationnel et technique, c'est sa transposition physique, et d'un point de vue théorique, c'est le moteur d'inspiration dont découle la composition spatiale, comme le fait Hitoshi Ake selon une technique appelée Katashi.

« La pratique du pliage oblige à concilier les parties avec le tout. C'est d'ailleurs le cas dans l'architecture non-standard et la fin des éléments monofonctionnels. Le mur et le sol sont pensés en continuité, ce qui explique une recrudescence de courbes. En origami, chaque espace de papier est dépendant du reste de la surface ce qui implique un certain sens de l'économie et symbolise pour moi un équilibre », écrit Etienne Cliquet sur son site nommé Ordigami (www.ordigami...) On pourrait dès lors qualifier le pli et ce qui s'y rattache d'ordre architectural, c'est à dire la manifestation architectonique et philosophique d'un phénomène.



[RÔLES ET EMPLOI DU PLI DANS LES CRÉATIONS DE L'HOMME]

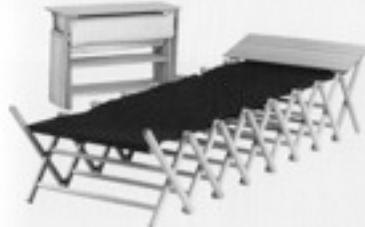
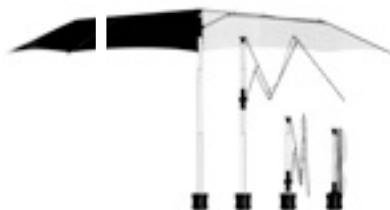
Cinétique du pli, "plier, déplier"

De nombreux objets usuels fabriqués comme réponse à plusieurs besoins spécifiques de l'Homme, utilisent la faculté de transformation du pli. Nous l'utilisons pour économiser de l'espace. A ce propos on peut penser à la chaise pliante, le vélo pliant, les pinces pliantes, les escaliers escamotables, ... Ces objets ne sont utilisés que ponctuellement et se plient lorsqu'on ne s'en sert pas afin de ne pas nous encombrer. Tout comme les ailes de la chauve-souris se replient lorsqu'elle n'est pas en vol, le parapluie se ferme quand la pluie cesse. Qu'aurait-on fait d'un parapluie non repliable ? L'usage s'en trouverait énormément réduit. Les objets repliables ont donc aussi pour fonction de permettre la mobilité.



Si une personne a intérêt à plier
improvisement son équipement,
c'est bien le parachute :
le laisser aller en ce domaine
peut avoir des conséquences
fâcheuses.

« Plier ne s'oppose pas à déplier, c'est tendre-détendre, contracter-dilater, comprimer-exploser (non pas condenser-raréfier, qui impliquerait le vide) », Le Pli, Deleuze.



Les plis permettent dans le cas ci-contre l'adaptation parfaite de la passerelle à la forme courbe de l'avion, afin d'éviter tout interstice dangereux.



Le habitats nomades et les tentes, par leur capacité à se plier pour occuper un minimum d'espace, laissent libre cours au vagabondage des Hommes. Les tentes touareg par exemple, sont conçues pour être transportables par un chameau. La structure tissée des yourtes également, est faite pour se replier en un volume réduit, ainsi que l'enveloppe de toile et de feutre. car la yourte accompagne les mongols dans leurs migrations, à dos de cheval.



Le pli peut permettre aussi de prêter à un objet de multiples fonctions. Une chaise peut se transformer si besoin est en escabeau, un couteau Suisse regroupe tout un tas d'outils, se plie et tient dans la poche !

Certains objets pliables sont conçus pour permettre la polyvalence d'un espace, comme par exemple les sièges escamotables des théâtres, ou le plancher mobile de la maison du peuple de Prouvé à Clichy.



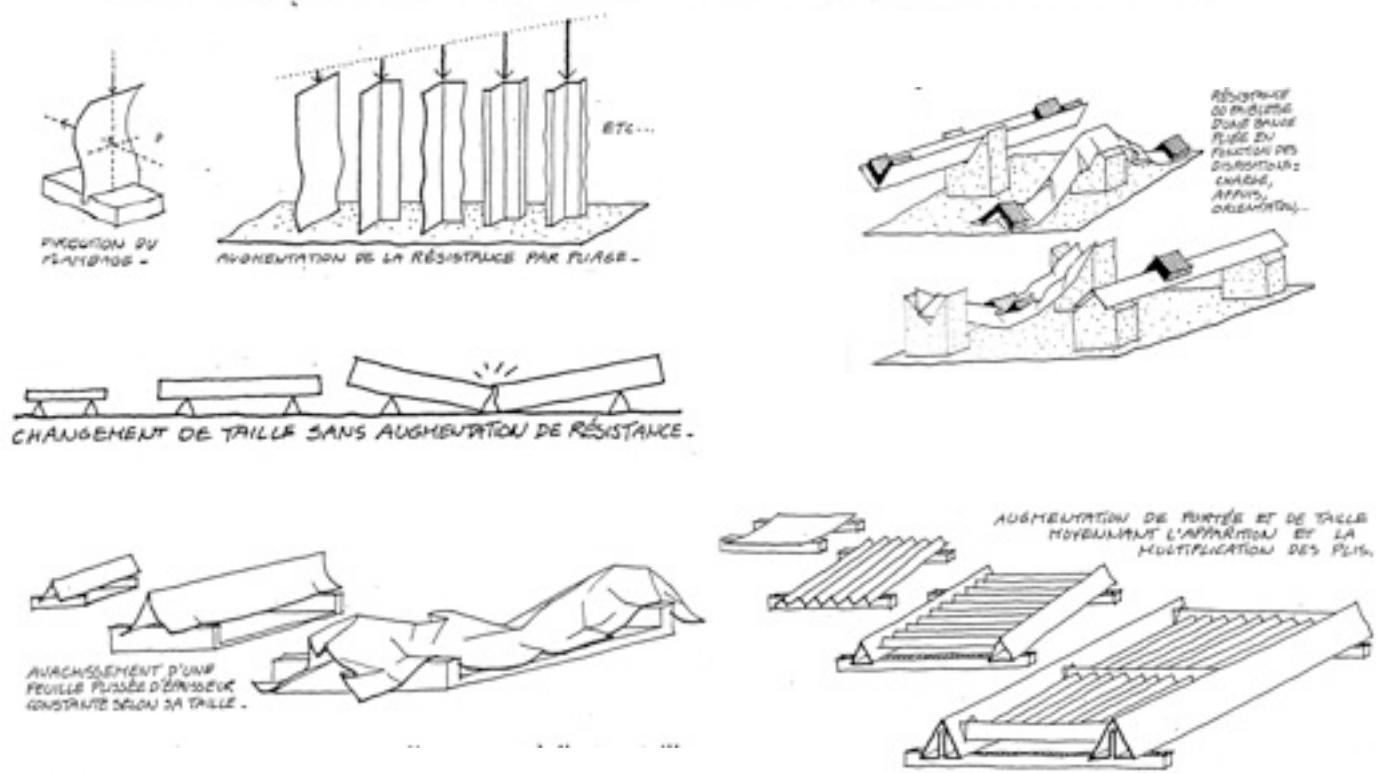
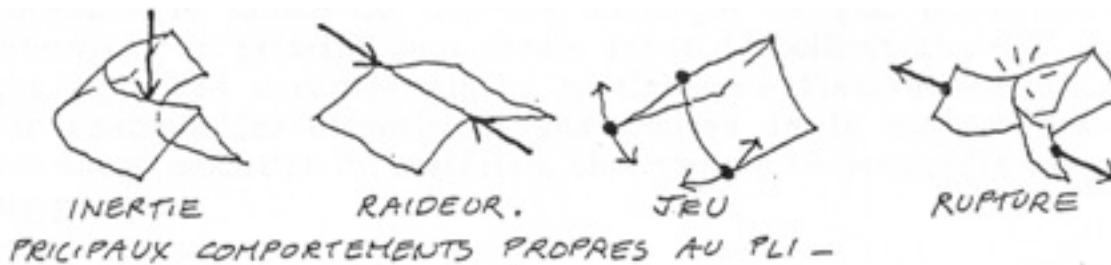
La propriété de dépliage/repliage des éléments constituant notre structure sera intéressante quand au stockage et au transport notamment, car ils n'occuperont qu'un volume réduit, ce qui permet de réduire les coûts de revient.

[RÔLES ET EMPLOI DU PLI DANS LES CRÉATIONS DE L'HOMME]

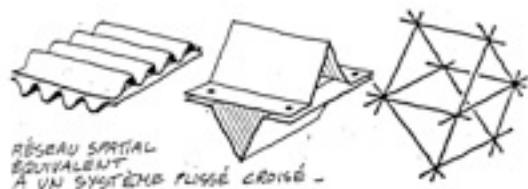
Le pli en tant que principe structurant

C'est le principe de résistance par la forme plutôt que par la quantité de matière mise en œuvre qui caractérise le rôle structurant du pli.

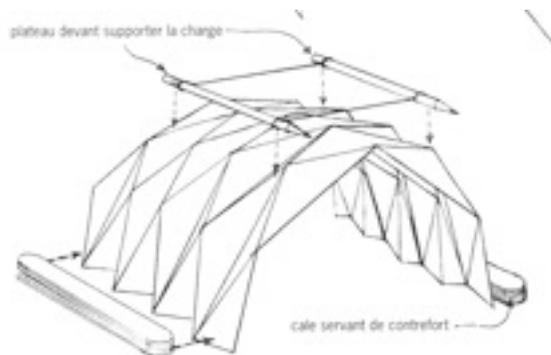
Le point de départ est une surface bidimensionnelle, qui par pliages, plissements, va devenir volume et organiser l'espace en trois dimensions. Le pli peut être vu comme un moyen d'organiser le vide. Répondant à un besoin naturel d'économie de matière et d'énergie, il permet de rendre résistante une surface sans cela souple et sans tenue. Ce principe de structuration d'une surface par le pli se retrouve sous maintes formes dans la nature et semble plus présent que la structuration par la masse. Le monde végétal par exemple regorge de ce type de plis, il suffit d'observer les feuilles des plantes pour s'en convaincre.



Principes structurants du pli selon Jean-Marie Delarue



Croiser les plis dans de multiples directions permet une résistance plus importante. C'est ce principe de croisement perpendiculaire de plis qui est employé dans la fabrication de certains cartons d'emballage. A partir de simples feuilles de papier, il est ainsi possible de constituer un matériau assez résistant.



“Une feuille de papier qui ne pèse que quelques grammes est capable de supporter la charge de livres pesant deux à trois cent fois son propre poids ! La coque cylindrique en papier plissé a besoin de contreforts pour absorber sa poussée vers l'extérieur, mais sa capacité de supporter une charge est bien supérieure à celle d'une toiture en voile plissé, et peut facilement atteindre quatre cent fois son propre poids.”, Mario Salvadori, *Comment ça tient ?*



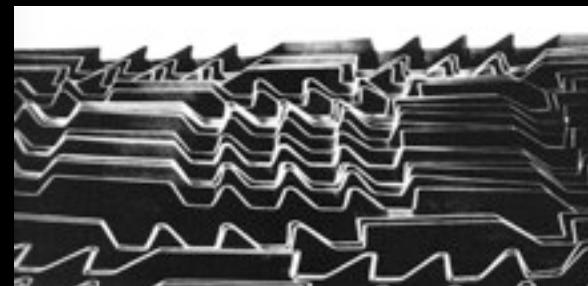
Toiture en voile plissé.



En ondulant la surface, il est possible de créer des voûtes suffisamment stables de quelques centimètres à quelques millimètres d'épaisseur, réalisant ainsi une importante économie de matériaux. "Le fonctionnement est alors identique à celui des voûtes plus épaisses. Dans ce cas, l'épaisseur effective, à l'intérieur de laquelle le polygone funiculaire peut se déplacer, ne correspond pas à l'épaisseur du matériau, mais à l'ampleur de l'ondulation." (l'art de structures, A. Muttoni)

Tirant parti de ce principe, Pier Luigi Nervi, en développant le ferrociment, alliage de métal et béton d'une épaisseur extrêmement fine, a été amené à concevoir des structures plissées.

Jean Prouvé, lui aussi, a développé son art au contact du pli. C'est l'acquisition d'une nouvelle machine en 1931, la plieuse, qui l'amène à renouveler totalement l'usage du métal dans le design et l'architecture. Le travail dans la masse, à coups de sueur et de marteau, a été remplacé par le travail de la fine tôle d'acier qui trouva dans le pli la résistance qui lui faisait initialement défaut. C'est ce que décrit bien Philippe Poitier dans un article intitulé Autour de la plieuse de Jean Prouvé, paru dans le n°40 des Cahiers de la Recherche Architecturale.



[RÔLES ET EMPLOI DU PLI DANS LES CRÉATIONS DE L'HOMME]

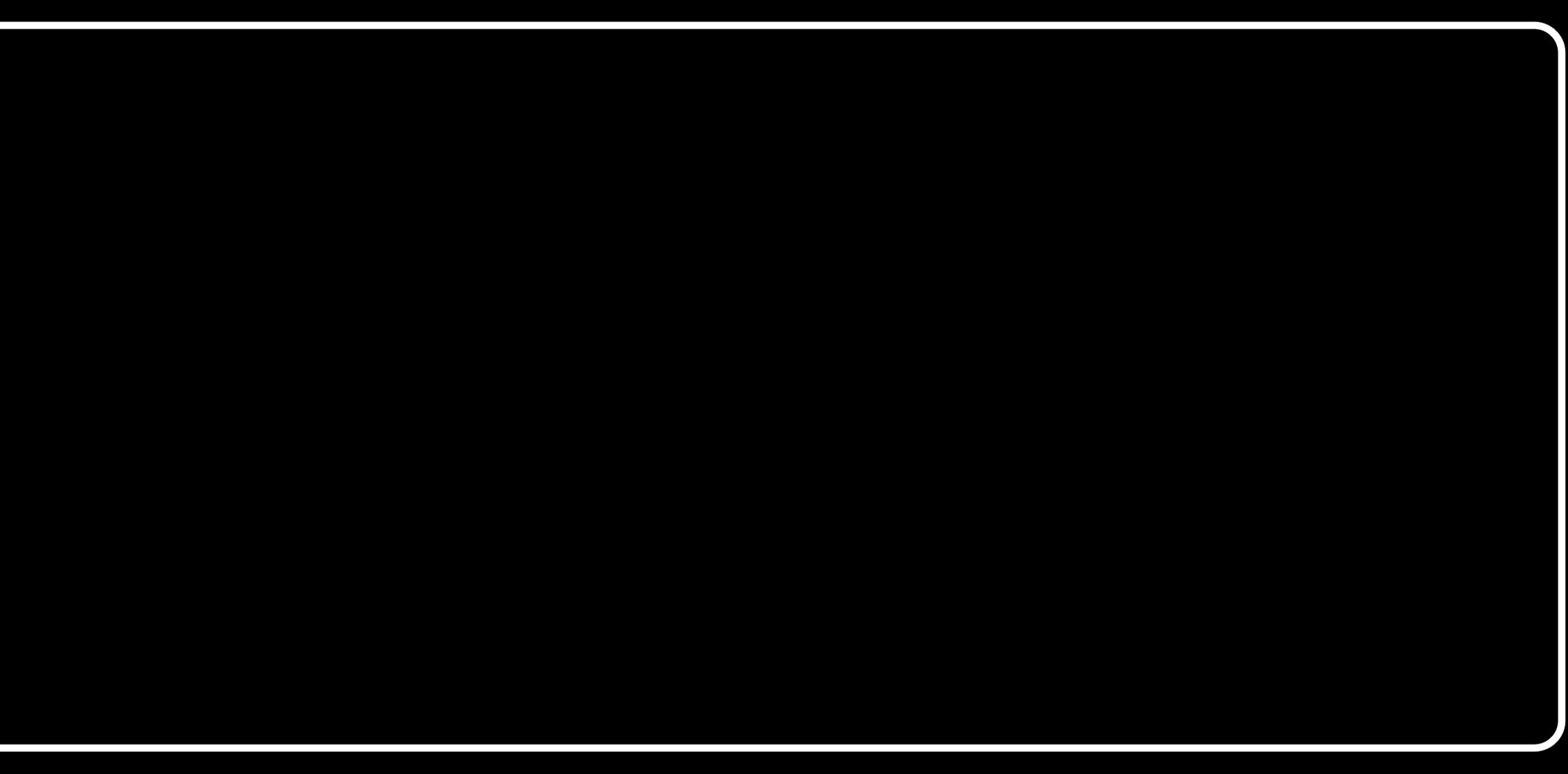
Technologie du pliage

"Trois processus de mise en pli :

-le formage, consiste à plier ou à cintrer par la force un demi-produit tel qu'un feuille, un tube ou une barre.

-Le moulage, ou le matériau en son état plastique vient occuper un cavité et se solidifie. (voir pavillon IBM, R.Piano)

-L'assemblage, consite à solidariser des pièces entre elles par différentes techniques." (constructions plissées, JF Brossin, p.4-8)



B. MISE EN FORME DE VOLUMES ET SURFACES PAR PLIAGE

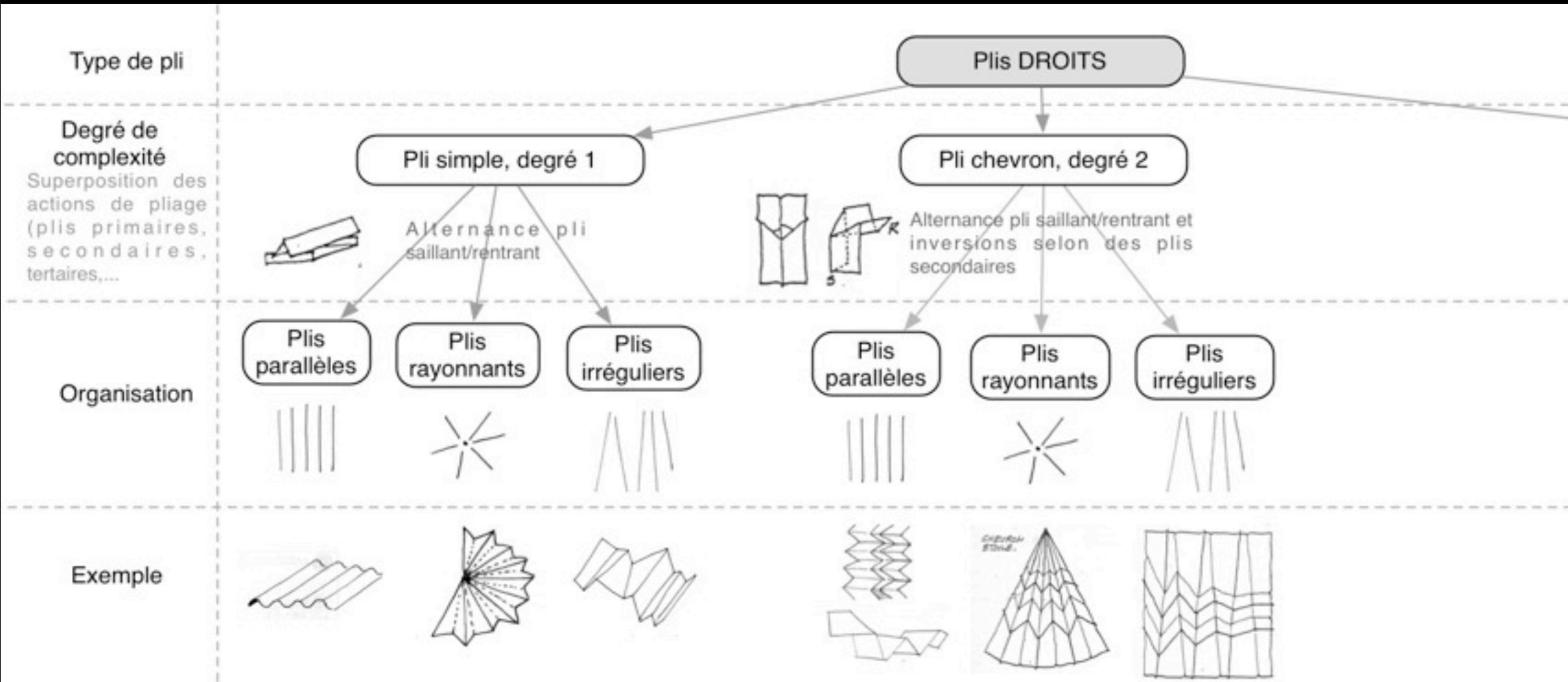
Classification des plis

Le pli revêt maintes fonctions dans l'organisation des êtres et des choses. Il s'agit, selon Jean-Marie Delarue, d'un processus universel de morphogenèse régissant les règnes minéral, végétal et animal.

Partout dans la nature, des formes plissées se constituent harmonieusement, elles sont les résultantes de nombreux facteurs en interaction. La même disposition de plis peut répondre judicieusement à plusieurs fonctions. Le pli dans son rôle structurant, c'est-à-dire rigidifiant par la forme une faible quantité de matière, n'est qu'une fonction parmi d'autres. Sans toutes les énumérer, l'on peut penser au pli comme processus de croissance, de complexification ou comme mécanisme d'éclosion. « Les métamorphoses de l'embryon par exemple, pour engendrer des organes caractérisés, s'accomplissent par replis donnant lieu à des multiples interfaces d'échanges énergétiques, des compactages d'étendues proliférantes, des nervurassions consolidatrices, des mécanismes d'éclosion, des replis articulaires mobiles...puis aux rides de la flétrissure. »(1)

Le pli se caractérise aussi par son aptitude à la contenance, par la manière dont il donne forme à la matière, il englobe, enveloppe.

Mais plier c'est aussi déplier. Le pli, au moment de sa constitution, par les forces endogènes ou exogènes qu'il implique, se fait aussi mouvement.



Plis COURBES

Pli complexe, degré 3 et plus



Alternance pli saillant/reentrant et inversions multiples selon des plis secondaires, tertiaires, quaternaires,...

Système multipolaire régulier

Système multipolaire irrégulier

Pli simple, degré 1



Pli chevron, degré 2

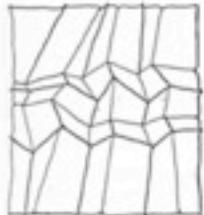
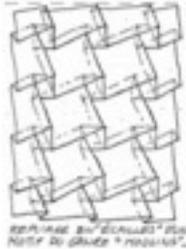
Plis parallèles

Plis rayonnants

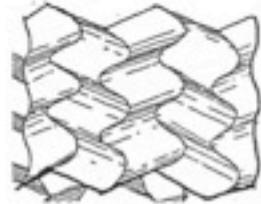
Plis irréguliers

Pli complexe, degré 3 et plus

Système multipolaire régulier et irrégulier

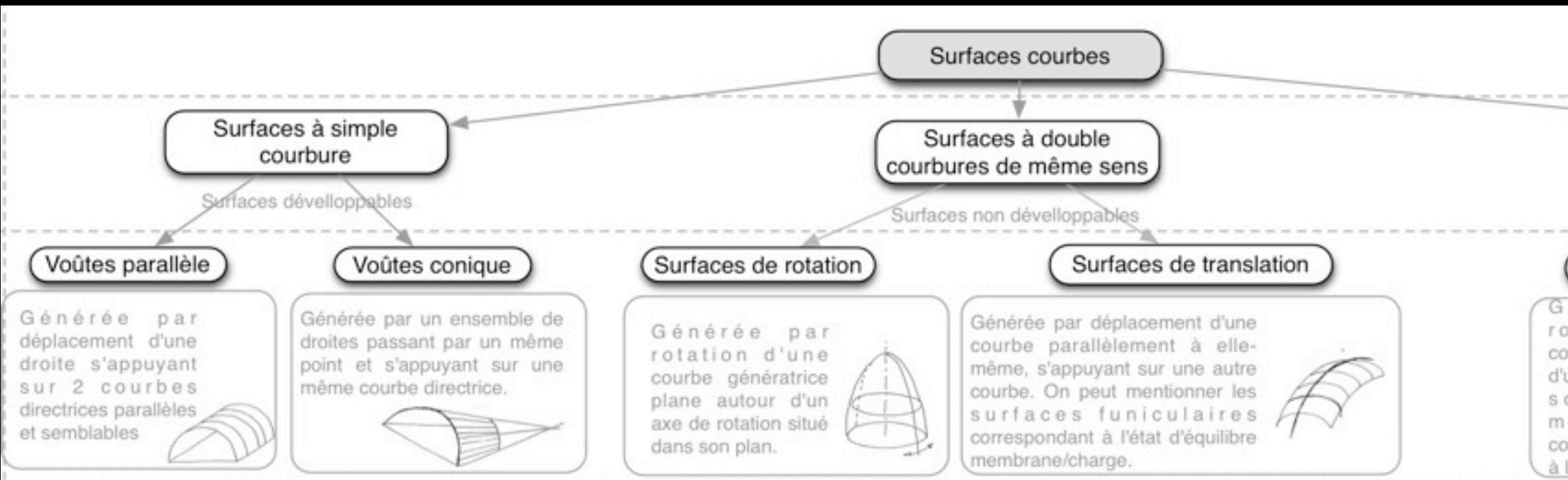


degré 1.

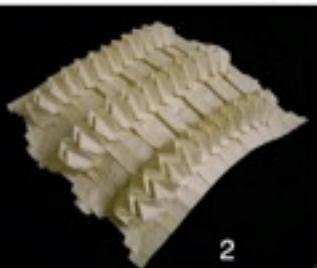


chevrons degré 2





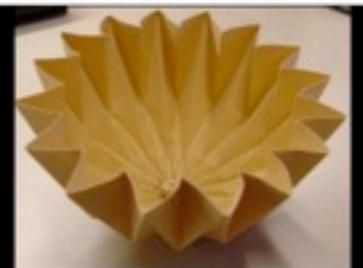
1



2



3



4



5



Surfaces à double de courbures inverses

Surfaces non développables

Surfaces de rotation

Générée par la rotation d'une courbe plane autour d'un axe situé dans son plan, le méridien étant convexe par rapport à l'axe.



Surfaces de translation

Générée par le déplacement parallèlement à elle-même d'une courbe génératrice s'appuyant sur une courbe directrice de sens opposé.



Surfaces "brisées"

Surfaces "brisées" régulières

Assemblage organisé de plans

Surfaces "brisées" irrégulières

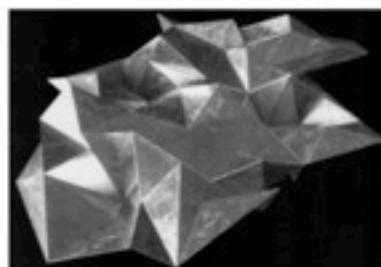
Assemblage chaotique de plans



13



14



15



16



6



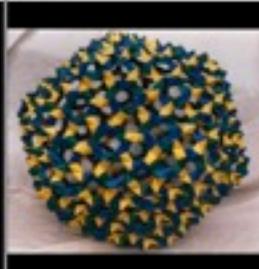
7



8



9



10

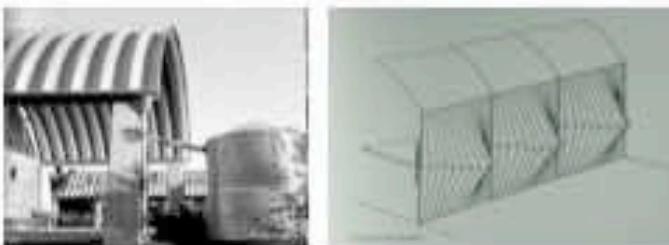


11



12

Plis simples réguliers

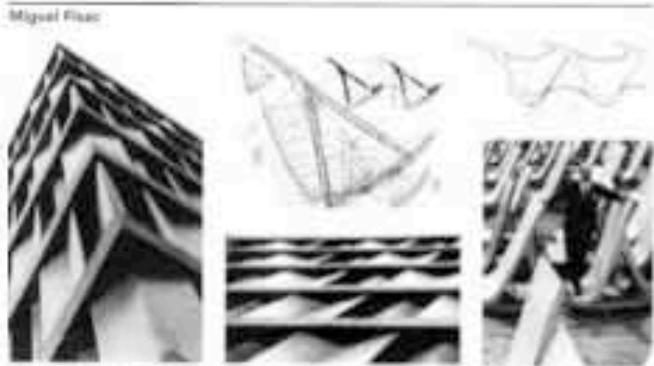


Pilis structurants, rythme, ombres et lumières



Plis réguliers formant une surface à double courbures de même sens. Les pilis sont ici structurants et participent à l'ambiance intérieure en rythmant la lumière.

Ondulations structurantes



Le pli est ici **générateur de la forme** du bâtiment.



Cinétique

Fre...
Maqu...
co u...
repli...

Surface "brisées" régulière



Architecture "topologique", les plis s'apparentent à des plissements de terrain. Ils sont constitutifs de l'essence même du projet.



Otto,
ette pour une
verture
le de stade..



Plis chevron

Les jeux d'ombre et de lumière sont particulièrement intéressant, de par l'organisation harmonieuse du pli chevron.



Surfaces courbes constituées de "caissons" pliés.

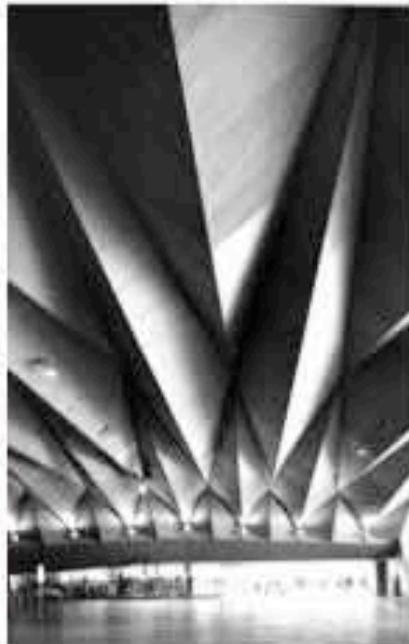
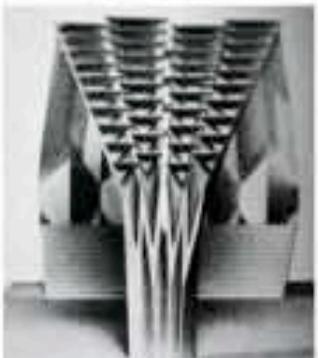
Walter Gropius
Monumento a los trabajadores. Weimar, 1922



Surfaces "brisées" chaotiques



Fluidité



Louis Kahn,...

Théâtre, forme complexe a double courbures constituée de caissons triangulaires de plastique plié.

