



HAL
open science

Figuration graphique et recherche structurale : constructions plissées

Jean-Marie Delarue, Jean-François Brossin

► **To cite this version:**

Jean-Marie Delarue, Jean-François Brossin. Figuration graphique et recherche structurale : constructions plissées. [Rapport de recherche] 0411/87, ADRI 1; Ecole d'Architecture Paris-Villemin; Secrétariat de la recherche architecturale (SRA). 1987, pp. 271. hal-03113133

HAL Id: hal-03113133

<https://hal.science/hal-03113133>

Submitted on 18 Jan 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MINISTERE DE L'EQUIPEMENT, DU LOGEMENT, DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE
ET DES TRANSPORTS

DIRECTION DE L'ARCHITECTURE ET DE L'URBANISME

SOUS-DIRECTION DE L'ENSEIGNEMENT DE L'ARCHITECTURE ET DE LA RECHERCHE

Figuration graphique
et recherche structurale

CONSTRUCTIONS PLISSEES

RAPPORT FINAL

Recherche placée sous la responsabilité scientifique de J.M. DELARUE
avec la collaboration de J.F. BROSSIN (Contrat n° 81 01 034 du 14/02/81).

EA PARIS Belleville



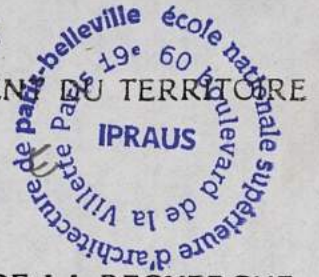
0011279

MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT, DU LOGEMENT, DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE
ET DES TRANSPORTS

DIRECTION DE L'ARCHITECTURE ET DE L'URBANISME

SOUS-DIRECTION DE L'ENSEIGNEMENT DE L'ARCHITECTURE ET DE LA RECHERCHE

MFN6145



Inv. 13670
MFN. 6145
COTE. CORDA. L.M.

Figuration graphique
et recherche structurale

CONSTRUCTIONS PLISSEES

RAPPORT FINAL

Recherche placée sous la responsabilité scientifique de J.M. DELARUE
avec la collaboration de J.F. BROSSIN (Contrat n° 81 01 034 du 14/02/81).

Inv. 13670
 MFN 6145
 COTE Corda 411



FIGURATION GRAPHIQUE ET RECHERCHE STRUCTURALE

Le cas des constructions plissées

Comme l'indique le titre général de la présente recherche "FIGURATION GRAPHIQUE ET RECHERCHE STRUCTURALE", l'objectif poursuivi est double :

- Traiter des techniques de représentation et d'assistance à la conception dans ce domaine peu familier pour l'architecte qu'est la **composition structurale**.
- Aborder cette problématique dans le registre bien particulier que constitue la **recherche en matière de structure**.

Dans la mesure où l'évolution de l'art de bâtir contribue effectivement au progrès de l'architecture, il s'agit de restituer à l'architecte un domaine de conception qui semblerait devenir progressivement l'apanage exclusif de l'ingénieur :

- En proposant des méthodes d'élaboration qui permettent d'accéder à un niveau élevé d'intelligence avec ce dernier.
- En indiquant des champs de recherche accessibles, susceptibles de procurer des applications innovatrices.

C'est à ces fins l'**approche morphologique des structures** qui a été envisagée :

- Parce que les problématiques de forme concernent particulièrement le concepteur qui doit intégrer dans la cohérence globale de l'organisation formelle des composantes d'ordre utilitaires, techniques et expressives exposant des valeurs culturelles.
- Parce que les systèmes de représentation et de figuration sont singulièrement propices à instruire les problèmes de forme.
- Parce que c'est une voie originale rarement abordée qui induit l'étude des fondements de composition structurale - propos relativement délaissés en regard des approches purement techniques - et qu'il convient de prolonger dans la lignée de ceux qui ont fructueusement œuvré en cette voie.

C'est le sujet des **constructions plissées** qui a été choisi à cause de la richesse et de la profondeur de ses implications :

- Parce que, en ce qui concerne la connaissance morphologique, c'est l'analyse des processus de morphogénèse qui s'avère déterminante, ce que constitue par essence le pliage, qui est un phénomène universel de transformation, et qui permet donc d'aborder une sorte d'étymologie des formes et des structures en tous domaines de l'existant, naturel ou artificiel.
- Parce que c'est un thème au travers duquel il est possible d'aborder la majorité des problématiques structurales (mécanique des systèmes, principe de résistance par la forme, technique de fabrication, mise en œuvre des matériaux, systèmes structuraux, rôles constructifs, voies de production, etc...). C'est un principe d'économie applicable à toute espèce de fabrication, et qui foisonne de possibilités d'applications nouvelles. En même temps que ses propriétés constructives, le pliage s'assortit aussi des autres capacités de la forme, aptitudes utilitaires, qualités plastiques, signification symbolique.

C'est un procédé traditionnel de tous lieux et de toutes époques, un domaine où maints bâtisseurs fameux se sont illustrés, et qui au-delà d'une simple acquisition de savoir faire pratique, constitue une connaissance qui mérite de faire partie intégrante d'une culture technique : le pliage est à ce titre une voie éminemment pédagogique, à la pointe de nombreux questionnements actuels.

En ce qui concerne le rôle de la **figuration**, le pliage est une véritable écriture de l'espace et de la matière, aux charnières des mondes uni, bi, et tridimensionnels susceptible de reproduire fidèlement l'apparence des formes. Or, la représentation graphique s'avère rapidement inopérante pour l'étude des formes plissées

et l'on remplace avantageusement celle-ci par la pratique même du pliage : c'est un procédé élémentaire, de réalisation immédiate, qui peut seconder chaque phase de conception, depuis l'idée de principe matérialisée avec un simple bout de papier, jusqu'à l'expérimentation sophistiquée sur modèle de simulation, qui permet alors de visualiser et d'objectiver les aspects qualitatifs et quantitatifs des comportements structuraux. Le pliage est aussi une modalité plus abstraite de représentation, par où peuvent se comprendre des systèmes qui ne sont pas effectivement pliés, mais auxquels ils sont étroitement apparentables par analogie de propriétés.

Aussi est-ce là un sujet particulièrement dense, dont paradoxalement les principes ne sont guère traités que de façon rudimentaire ou parcellaire, en tous cas pas exposés de façon systématique ni méthodique en chacun de ses registres mathématique, mécanique, bionique, morphologique, structural, technique, artistique, sémantique, historique etc...) pas davantage qu'il n'existe d'ouvrage d'enseignement consistant sur ce propos, qui constitue pourtant une voie pédagogique majeure, et dont sauraient témoigner des expériences illustres, analogues à celle du Bauhaus.

Ce dernier rôle **pédagogique** est aussi une dimension du sujet qui a été pris en compte ici :

- Parce qu'il a dernièrement été avancé des propositions de recherche mettant en question l'approche de la construction dans l'enseignement de l'architecture.

- Parce que la substance même de cette recherche a été développée et testée dans un contexte d'expérience pédagogique, dans le cadre d'un enseignement de morphologie dispensé à l'École d'Architecture Paris-Villemin. A cette occasion l'ensemble des considérations ci-dessus évoquées y a été systématiquement développé. Or, ce ne peut être l'occasion de présenter ici une matière aussi foisonnante, quasi encyclopédique, que d'autres occasions devraient permettre d'exposer. Ne sont donc argumentés que les éléments qui concernent très immédiatement l'aspect structural des formes plissées.

Ces données sont présentées sous forme d'essais indépendants, qui peuvent être considérés séparément, mais qu'une vision d'ensemble rend assurément plus cohérente.

Ces différents volets sont respectivement :

- Un essai morphologique et bionique sur les **constructions plissées de la nature**, car l'observation des systèmes naturels est une voie classique de prospection pour la connaissance des structures, qui permet de mieux apprécier, en comparaison avec la rationalité générale des organisations, l'éventuelle spécificité des réalisations de l'homme - et d'y puiser l'inspiration.

- Un inventaire des **principes structurants du pli étayé** de propositions de manipulations démonstratives incitant à la composition structurale et à l'expérimentation constructive.

- Un panorama des **matériaux et techniques de mise en plis** assorti d'exemples d'application et de références bibliographiques et historiques.

- Le compte rendu d'une phase de conception structurale, qui met à l'épreuve le bien-fondé des analyses qui précèdent. Il s'agit de la mise au point d'un système original de construction dénommé "**Voile funiculaire plissé**" qui ouvre de nombreuses perspectives d'application et qui, depuis sa conception, a donné lieu à des expériences d'habitat économique à l'usage du tiers monde.

Certains de ces éléments sont présentés sous forme de traité didactique afin de servir ultérieurement de support à l'enseignement.

Ils ont été rédigés à des moments assez éloignés, d'où leur relative hétérogénéité de présentation.

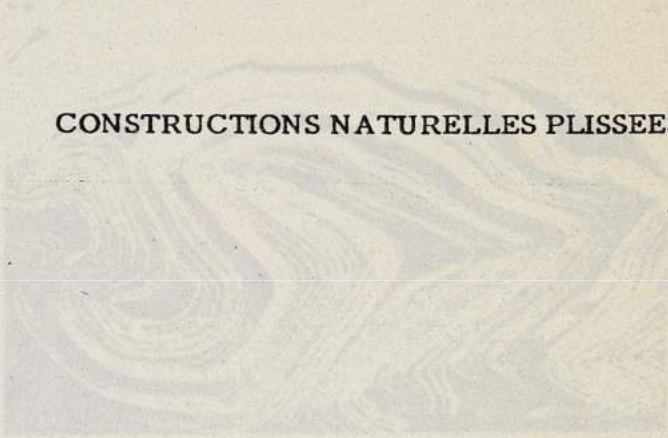
1

CONSTRUCTIONS NATURELLES PLISSÉES

JÉAN-MARIE DELARUE

Cette approche repose en fait le pliage - qui est en général la conséquence de quelque influence - sur un processus quasi typologique, la cause effectrice de certains comportements (en un contexte d'interaction réciproque, une action de l'environnement sur l'objet modifie ce dernier, qui réagit dès lors différemment sur l'environnement qui à son tour le transforme éventuellement, et ainsi de suite...)

Il est pas ailleurs montré comment l'analyse morphologique est en matière de pliage grandement facilitée par la réalisation de modèles de simulation.



CONSTRUCTIONS NATURELLES PLISSEES

Point de vue bionique. Il s'agit là de transposer et d'appliquer aux réalisations de l'évolution les mécanismes, les nature, efficace et économique, perfectionnés par l'action de l'adaptation et de la sélection. On se réfère à ces réalisations de ses propres idées, sans se vanter, mais en montrant tout simplement les différences (même si quelques cas très rares sembleraient se présenter) dans les réalisations humaines et animales, végétales, minérales, d'autres réalisations.

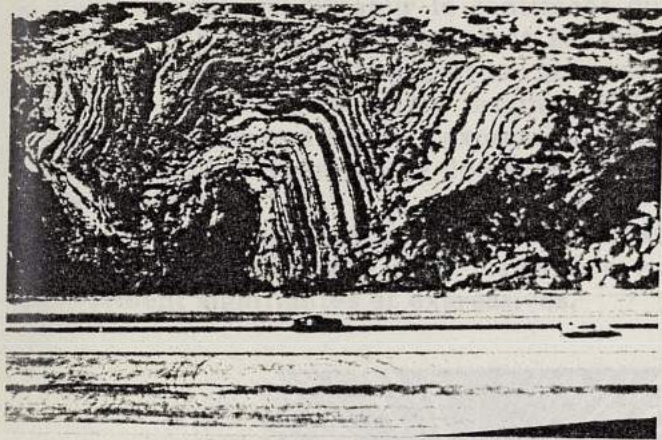
L'observation du pliage et de ses formes dans les constructions de la nature est instructive principalement selon trois points de vue, morphologique, bionique et artistique.

Point de vue morphologique. Il s'agit de décrire et d'expliquer la raison d'être de tel type de configuration, d'en énoncer les propriétés, d'en analyser les comportements. Or, bien que le pliage soit un processus universel de morphogénèse, un phénomène naturel qui se manifeste en tous domaines de l'existant, il n'a été que fort peu étudié dans les ouvrages de morphologie générale (évoqué sans explication par d'Arcy Thomson et Stevens, ignoré par Monod Herzen et Sainte Lagüe), alors que nombre d'organismes semblent conditionnés par des règles de pliage. Les formes plissées sont toutefois abordées en quelques secteurs de morphologie spécialisée : l'anatomie, la dermatologie sont des domaines où foisonnent les plis, mais ceux-ci n'y sont guère analysés parce qu'ils n'apparaissent que comme conséquence, et non comme cause nécessitant dès lors l'attention. C'est en géomorphologie que le pliage est le plus étudié, mais si ses effets y sont à la rigueur bien observés, ses propriétés et règles intrinsèques de transformation n'y sont pas énoncées.

Sans épiloguer sur le débat déterminisme/finalisme relatif aux raisons motrices de l'évolution et de ses formes, cette observation purement morphologique - qu'il faut aborder à la lumière des principes géométriques, mécaniques et structuraux développés en d'autres chapitres, affinera la connaissance des corrélations forme/fonction (comment certaine configuration favorise l'accomplissement de telles catégories d'effets, et comment à l'inverse, tel effet sait éventuellement se réaliser selon diverses formes). C'est aussi l'occasion de comprendre comment, un peu à la manière du principe de synergie, la même disposition de pli coordonne harmonieusement l'accomplissement de plusieurs rôles simultanés.

Cette approche expose en quoi le pliage - qui est en général la conséquence de quelque influence, est aussi parfois, selon un processus quasi cybernétique, la cause effectrice de certains comportements (en un contexte d'interaction réciproque, une action de l'environnement sur l'objet modifie ce dernier, qui réagit dès lors différemment sur l'environnement qu'à son tour il transforme éventuellement, et ainsi de suite ...)

Il est par ailleurs montré comment l'analyse morphologique est en matière de pliage grandement facilitée par la réalisation de modèles de simulation.

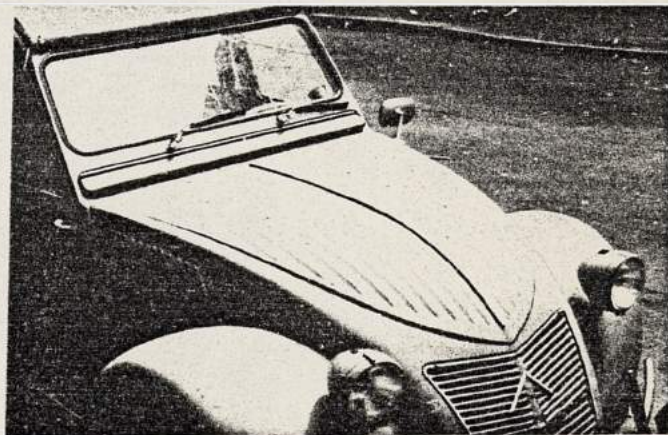


Point de vue bionique. Il s'agit là de transposer et d'appliquer aux réalisations de l'homme les mécanismes d'une nature efficace et économe, perfectionnée par l'action de l'évolution et de la sélection.

On ne maîtrise la nature qu'au respect de ses propres lois, aussi ne s'agit-il pas là de recopier tout simplement des apparences (même si quelques cas triviaux sembleraient le permettre) mais bien plutôt de comprendre les principes profonds qui régissent les phénomènes, que l'on peut dès lors transposer à d'autres matériaux, d'autres échelles, d'autres réalités.

On ne manquera pas d'observer en quoi l'étude de la nature s'avère être, pour quiconque prétend l'aménager, une source permanente d'inspiration, et de vérifier que la majorité des inventions de l'homme sont déjà présentes dans les constructions de la nature (ainsi n'est-il pas de raison nouvelle pour laquelle l'homme fasse usage du pli qui n'existe déjà "au naturel").

Les ouvrages de bionique sont très rares, tant cette approche, de pratique fort ancienne pourtant, est révolutionnée par les moyens d'analyse récents. Plus rares encore sont les traités de bionique concernant la construction, voire même l'architecture - et qui n'abordent dès lors le pliage que de manière rudimentaire, surtout pour des aspects structuraux et mécaniques.

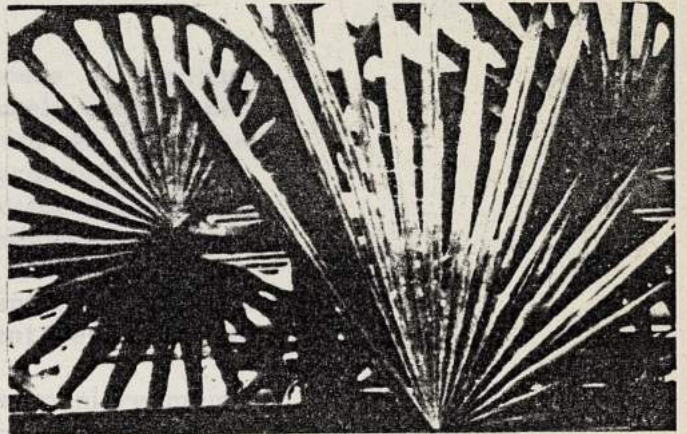
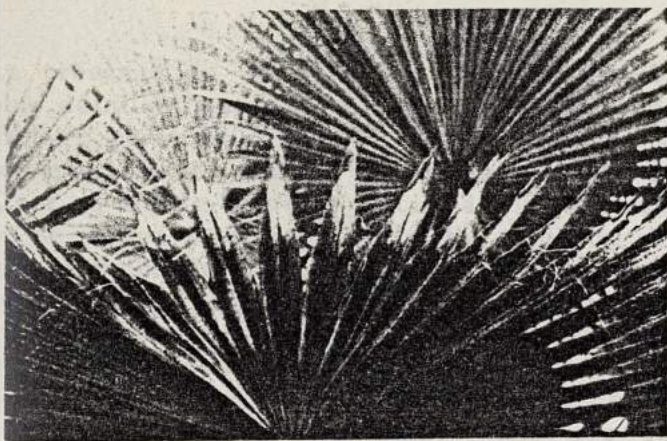


Point de vue artistique. Ce que nous percevons, la qualité sensible que nous ressentons émotivement, les données que nous interprétons symboliquement nous touchent par résonance à des situations antérieurement vécues, enregistrées par l'expérience personnelle, inculquées par l'éducation et véhiculées par la culture. La nature en ses formes présente donc un terrain où résident des réalités objectives, qui constituent le dénominateur commun à toutes nos expériences et cultures : là sont des références premières qui fondent l'étymologie d'un langage des formes à partir duquel, par représentation s'établit une communication.

Il s'agit en somme d'établir le sentiment du beau, (vertu de l'objet sensible et signifiant) sur des bases rationnelles qui ne soient pas uniquement subjectives ; ainsi apparaît une harmonie entre la connaissance sensible et la rigueur scientifique, qui tend à des vérités objectives.

Une telle volonté n'est guère originale : l'observation de la nature en tous lieux et époques constitue un fondement de l'expression artistique, comme en témoigne la réflexion de ceux-là mêmes qui exercent en ce domaine, et maints ouvrages fameux participent à ce type d'éveil de la sensibilité.

Rien n'existe cependant qu'occasionnellement quant aux formes naturelles du pliage, bien que celui-ci, par la diversité et le caractère essentiel de ses effets soit à l'origine d'évocations intensément signifiantes et expressives.



Sans prétendre étudier systématiquement l'ensemble des manifestations du pliage dans les formes de la nature, sont succinctement analysés ici les principaux rôles, comportements, et types de formes plissées, observés selon les classiques divisions de la nature, règnes minéral, végétal et animal.



CONSTRUCTIONS VEGETALES

La présence du pli chez les végétaux est exposée de manière plus détaillée que dans les autres systèmes naturels abordés par ailleurs parce qu'il est peu de domaine du vivant où le pliage soit avec clareté un facteur morphogène aussi déterminant.

C'est un monde commun, facile à observer sans dispositif spécial, où le pliage intervient à chaque stade du développement de la plante (éclosion, croissance, flétrissement) et qui 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).

Les principaux rôles que le pliage assume, à la manière même dont l'homme en fait usage dans ses fabrications y sont représentés :

- . Modalité d'occupation de l'espace (compactage minimisant, partage multiplicateur, contenance protectrice, prolifération "hyper-spatialisante", chevauchements distributifs...)
- . Mécanique évolutive (variations d'encombrement, expansion de croissance, contraction régressive, motricité adaptative...)
- . Structure (nervuration d'inertie, imbrication solidarisante).

De ce dernier point de vue structural, les plantes sont de véritables leçons lisibles de résistance des matériaux, où la matière est sculptée par les contraintes en présence selon des diagrammes vivants d'équilibre de forces. Mais tandis que l'animal, par sa mobilité, est soumis à des charges variables qui nécessitent des formes de résistance complexes et diffuses, la plante, sédentaire, est assujettie à des contraintes plus permanentes et simples qui conduisent à des formes de résistance plus caractérisées, et à l'organisation desquelles le pli participe avec l'extrême économie de moyens inhérente aux règles de nature.

Le végétal, par l'évidente vigueur de ses formes structurales, assorties d'une forte charge symbolique, a inspiré maintes réalisations constructives et productions artistiques (picturales, sculpturales, motifs décoratifs) que la présence du pli, avec l'affichage explicite de ses effets, rend plus "parlantes" encore.

Modalités d'éclosion, croissance et forme

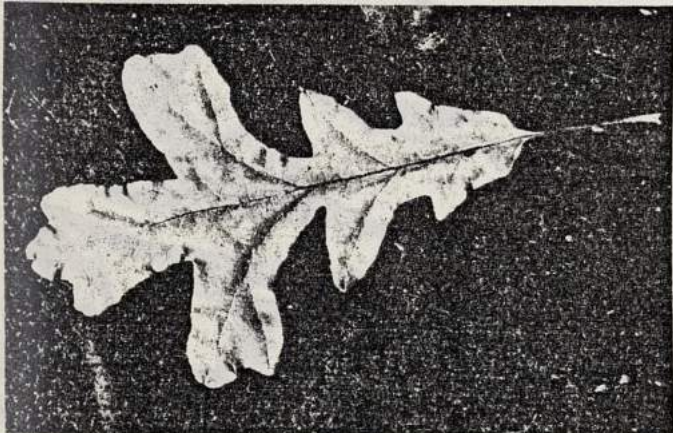
De nombreux feuillages sont symétriques en raison de l'équivalence des rôles selon chaque direction de développement et comprennent donc dans leur forme générale la disposition par essence équilibrante qu'est la symétrie bilatérale (que des influences ultérieures externes viennent fréquemment perturber).

Les phases initiales de la croissance se déroulent dans l'espace restreint du bourgeon ou du germe. Les poussées de la turgescence retenue provoquent des perturbations par repliage. Ce compactage imposé, constitué de superpositions quasi-moulantes, favorise une auto duplication de la forme par jeu de symétrie bilatérale (fold symmetry en Anglais).

Par ailleurs, la multiplication cellulaire qui cause la croissance, procède par dédoublement, processus qui s'accorde encore naturellement avec les compositions de symétrie bilatérales.



Tulipier. La préfoliation, c'est-à-dire la disposition de la feuille dans le bourgeon, est dite ici conduplicée/reclinée. Chacun des deux lobes du limbe de ces feuilles de *Liliodendron tulifera* sont encore étroitement accolés l'un à l'autre à un stade encore tardif de la croissance, expliquant bien là une origine de la bilatéralité par pliage.



Chêne à gros fruits. Cette frappante symétrie évoque les jeux traditionnels Polonais, faits de papiers pliés découpés, tant la nature du processus générateur s'y apparente.



Hêtre. Après germination de la faine apparaît la feuille primordiale du hêtre. Chaque lobe est intimement imbriqué dans les replis de l'autre, dans un jeu de positif/négatif qui réalise un quasi moulage.

Dispositions embryonnaires

Lors des métamorphoses de la vie, le pliage assure, entre autres rôles, la transition, entre plusieurs états d'occupation de l'espace. Trois étapes sont à considérer : les états extrêmes, repliés ou déployés, ainsi que la phase intermédiaire de transformation. Ces situations participent généralement d'une même cohérence globale étant donné la continuité de l'évolution, même lorsque les plis changent d'emplacement sur la surface qu'ils articulent.

L'observation de l'état compacté est intéressant car c'est généralement la condition initiale du bourgeon ou du bouton, des plus cohérentes pour la sculpturation de la forme.

Il importe d'y comprendre en quoi cette phase de développement, qui est intégralement prédéterminée par l'information génétique qui régule la croissance, peut aussi s'avérer déterminante pour le déroulement ultérieur du processus, ainsi que pour la définition même de la forme de la plante.



Choux rouge. L'observation détaillée de la coupe transversale montre que le plissement obéit aux ordonnances spiralées de la phyllotaxie (croissance par figures semblables compactées en position optimisante).

Le plissement s'organise à deux niveaux :

- Un niveau général en zigzags orientés, tels les "plis couchés" en géomorphologie, où les replis d'une feuille sont imbriqués dans ceux de la voisine.

- Un niveau local où les plis s'organisent par repliement sur eux-mêmes, constituant des "tampons" dans l'interstice des nervures ; là encore l'accordéon prédomine.

La disposition globale de tous ces plis manifeste une double astreinte radiale et circonférencielle.



La coupe longitudinale montre que les replis, toujours en accordéon, sont soumis à une astreinte méridienne ; la surface, comprimée en toutes ses directions tangentielles, se dirige par replis vers la seule directions de liberté possible, l'extérieur, canalisant la pression intérieure qui produit l'éclosion.

Préfoliation. Ces planches montrent quelques dispositifs de préfoliation en divers végétaux. Ces états compactés sont conditionnés par la modalité de croissance embryonnaire, et sont généralement en harmonie avec la structure de la feuille épanouie.

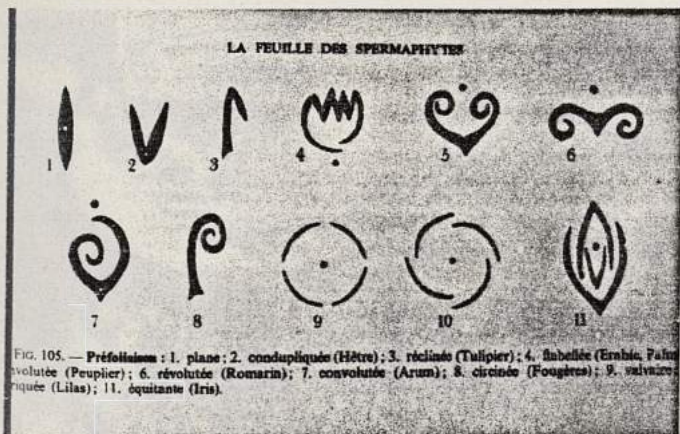


FIG. 105. — Préfoliations : 1. plane ; 2. conduplicata (Hêtre) ; 3. réclinée (Tulipier) ; 4. lobée (Erodium, Pâquerette) ; 5. révolutive (Romarin) ; 6. convolutive (Arum) ; 7. circinée (Fougères) ; 8. valvée (Lilas) ; 9. échantonnée (Iris) ; 10. ... ; 11. ...

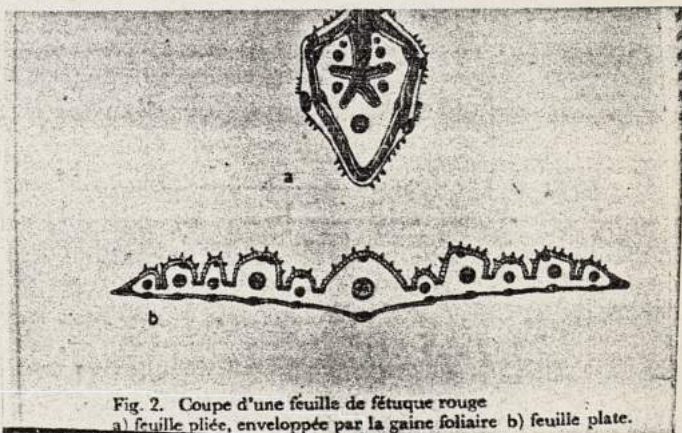
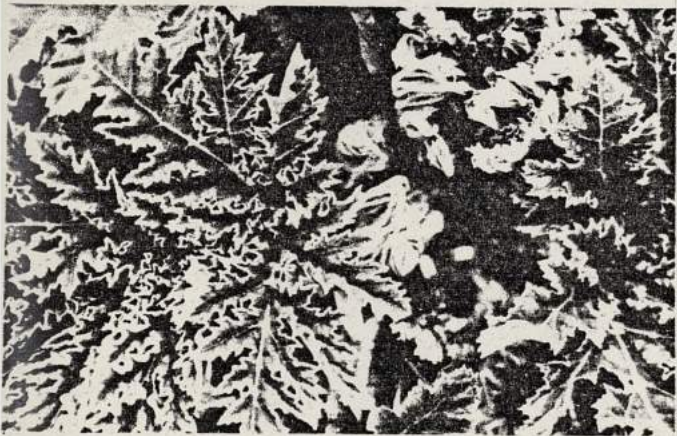
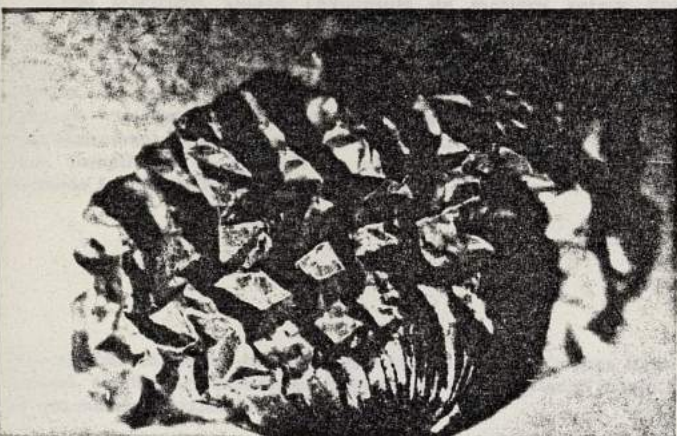


Fig. 2. Coupe d'une feuille de fétuque rouge a) feuille pliée, enveloppée par la gaine foliaire b) feuille plate.

Rhubarbe. Ces chiffonnages apparaissent bien désordonnés car ils correspondent à la forte complexité du système de vascularisation secondaire de ces lourdes et larges feuilles qui sont irriguées d'une quantité importante de suc. Remarquer la feuille compactée en boule, enveloppée dans sa gange rétentrice et protectrice.



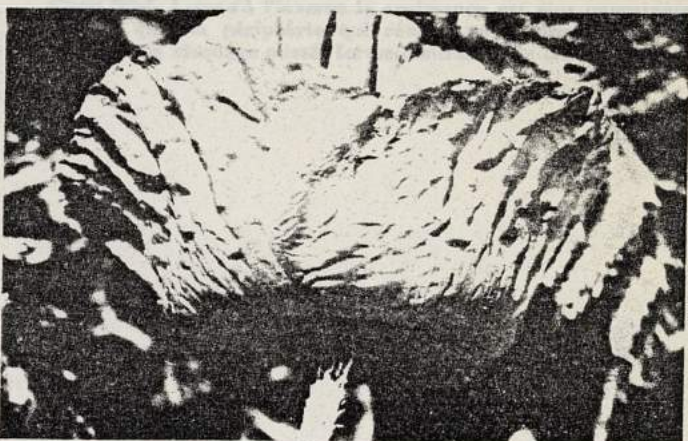
Berce géante. Une disposition localement symétrique du limbe est compatible avec le système de plis que constitue le réseau globalement arborescent des nervures primaires et secondaires. L'ensemble réalise une conjugaison accordéon/éventail, comme l'illustre le parcours zigzagant de la limite périphérique de cette feuille de Berce Géante du Caucase. (Un tel niveau de complexité est nécessaire à cause de la stature imposante de la feuille qui, à l'état adulte, atteint 1,50 m de long).



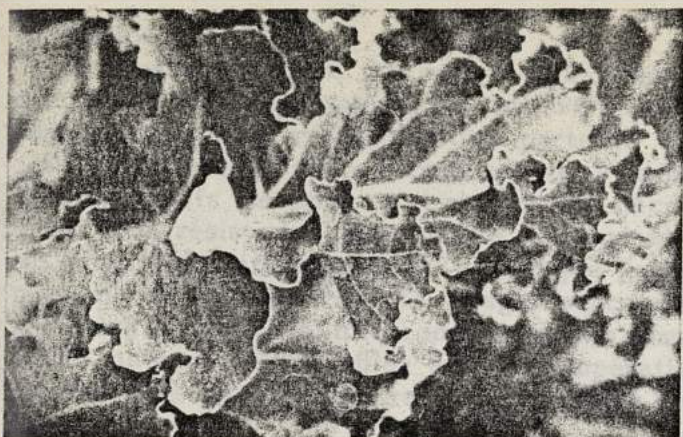
Coquelicot. La préfloraison du coquelicot (état de la fleur avant son éclosion est dite, selon le terme botanique, chiffonnée) : il ne saurait guère en être autrement pour des membranes, aussi tenues, étendues et isotropes, contenues dans un réceptacle aussi restreint.

La forme des sépales, dont l'ouverture a été artificiellement provoquée, montre deux directions perpendiculaires de courbure extrême (méridiens et parallèles) qui correspondent aux directions principales des forces qui s'exercent vers l'intérieur : Leur conjugaison produit assez régulièrement un froissage en chevron, qu'il faut comprendre comme le fruit de deux contractions perpendiculaires.

Tant qu'ils existent, ces plis rigidifient les pétales qui, à peine dépliés, s'affaissent et tombent.



Potentille. L'éventail, et sa mécanique élémentaire, est un archétype premier de pliage. Il apparaît en toute feuille ou fleur dont le pétiole, nécessairement unique, conditionne une organisation centrée (nervation palmée).

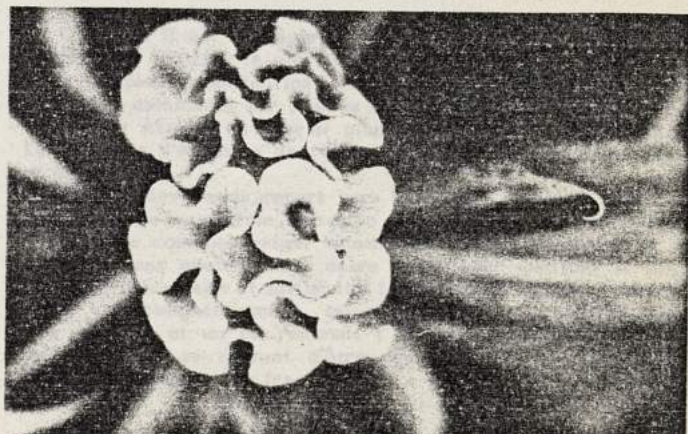
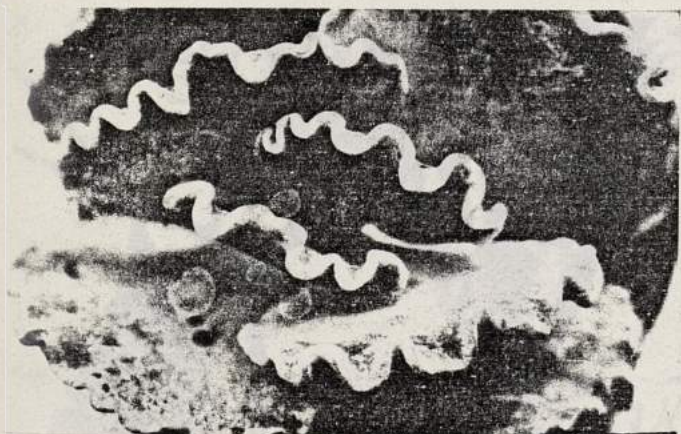


Chou maritime. Quand l'expansion de matière autour d'un point est plus importante à la périphérie qu'au centre, il survient, comme en des "chips", la formation d'une surface à double courbure inverse. De telles surfaces ne peuvent matériellement pas, sans détours ni contours, se disposer dans l'étendue limitative de l'espace tridimensionnel qui les contient. La disposition nécessairement compactante qui en résulte s'aménage en replis dont l'amplitude va s'exagérant au pourtour. (Et la croissance de cette feuille s'effectue par la périphérie...)



Chou frisé. Lorsqu'à l'inverse la croissance est plus importante au centre qu'à la périphérie qui réalise un support rétenteur, il en résulte un cloquage plissé, forme contrariée de la convexité.

Des raisons analogues conditionnent ces gaufrages d'algues (laminaires), feuilles de verbascum, de plante grasse (cotyledon indulata) et ces curieux pétales de fleur exotique.

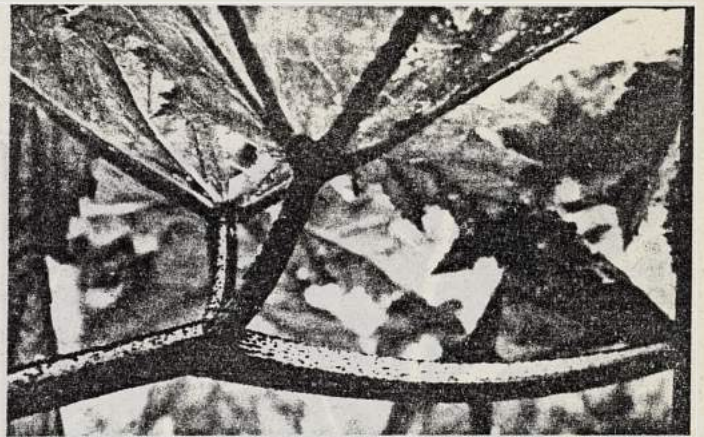


Nervation.

Le système vasculaire des monocotylédones est parallèle. Il est ramifié chez les dicotylédons. Il apparaît en ce cas une différence assez importante entre nervure porteuse et membrane portée - et corollairement entre espace serveur et espace servi.

Les impératifs mécaniques et structuraux nécessaires à la croissance et à la résistance de la plante s'accordent parfois si bien avec les propriétés intrinsèques du pliage que l'on peut dès lors légitimement se demander si le pliage, parce qu'il est la condition première de la plante, n'en conditionne pas aussi la forme finale.

Cette adéquation des rôles est plus impérative chez les grandes plantes que chez les petites, et ses effets n'en sont là que plus tangibles.



Pousse de Berce Géante. Les replis du limbe, encore fragiles, sont judicieusement abrités à l'intérieur et suivent naturellement le déploiement de l'ossature de nervures.



Gunnera. Il est de règle que les nervures, dans leur état de distribution spatiale le plus fréquent, s'anastomosent en bifurcations simples (ramification ternaire autour des nœuds). Cette forme est dominante car c'est la disposition minima d'intersection qui puisse établir un réseau planaire, qui correspond encore à l'état stable d'équilibre de tension régissant le travail des câbles et membranes.

De chacun des nœuds repart vers l'intérieur un pli du limbe qui constitue une quatrième direction spatiale ; or la forme minima de repliage composé exige, comme ici, quatre directions de pli, qui articulent quatre faces entre elles, pour instituer le degré de liberté nécessaire et suffisant à la réalisation du mouvement.

Et il y a obligatoirement, selon le sens qu'on considère, trois plis saillants et un pli rentrant ; les plis saillants, vulnérables puisqu'exposés se doivent d'être renforcés. Et le pli rentrant, protégé, peut demeurer fragile...



Aralia. Une cohérence identique régit la constitution de la feuille d'Aralia, où l'on observe le même type de dépliage à un stade plus développé.

Chaque fourche de nervures constitue "par construction" un support solide sur lequel se dispose le dièdre du limbe, selon la logique de l'arc à trois rotules, forme première d'indéformabilité.

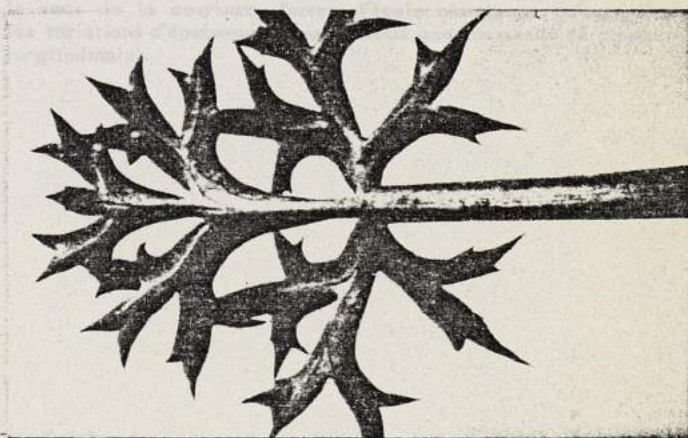
Autre correspondance : c'est à l'emplacement du pli "fragile" que, tel un papier que l'on plie pour le déchirer, qu'apparaissent les échancrures du limbe.

Ces coïncidences morpho/logiques, tant mécaniques que structurales, se constatent en d'autres modalités de nervuration, qu'elles soient pectinées (dessous de feuille de framboisier), qu'elles soient palmées (feuille de mauve) ou équitantes (rhubarbe).

En chaque cas on observe cette évidence : les zones d'influence des nervures secondaires issues des nervures primaires ont nécessairement quelques frontières communes qui n'ont certes pas besoin d'irrigation : là donc le pli s'établit.

Les nervures primaires, les plus importantes, sont toujours en partie inférieure ; elles constituent un support solide qui étaye l'"aspiration" des nervures secondaires à monter plus haut encore, vers la lumière nourricière ; et le pli le plus fragile, après avoir été protégé vers l'intérieur, est désormais une crête exposée.

Tous ces gaufrages ont un effet structurant par l'inertie qu'ils procurent à la feuille. Ils sont disposés selon la forme active des systèmes anti-funiculaires.



Ramure de panicaut. Cette plante vit en milieu desséché. Sa feuille est coriace, épineuse - et résiste donc à des poussées axiales. Le pli participe à cette aptitude, ainsi, bien sûr, qu'à la résistance générale en flexion.

Effets structurants du pli.

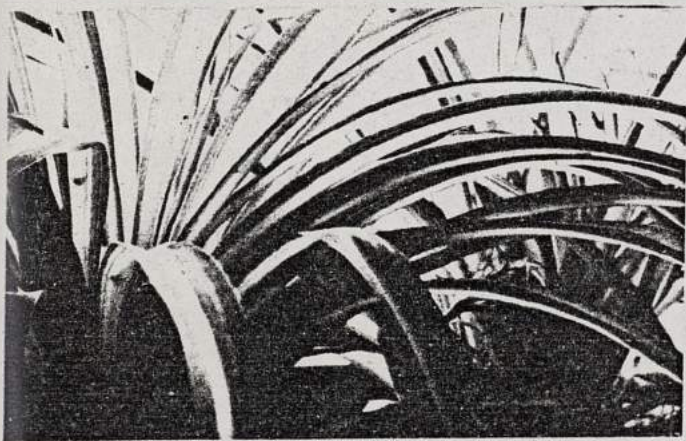
Tout état ne subsiste qu'en vertu de son aptitude à résister aux influences contraires, aussi l'efficacité structurale qui organise des stabilités matérielles est une condition sine qua non de l'existence. Le pli est, chez les végétaux, une des modalités privilégiées de conformation qui, en même temps qu'elle articule la croissance, organise une construction résistante.

Cette aptitude procède régulièrement du principe d'inertie qui consiste, puisque les forces ne se transmettent qu'au long de la matière (qu'en fait elles constituent), à orienter la surface au plus près de la direction des forces en présence, généralement l'orientation verticale de la pesanteur. Telle est la logique du travail de surface, à quoi participe aussi sa courbure.

Ces principes s'organisent de manière à remédier à la faiblesse matérielle de la feuille, fatalement disposée en d'aventureux porte-à-faux, et globalement orientée comme le veut sa fonction, le plus perpendiculairement possible à la direction moyenne de rayons lumineux.

Cet effet structurant est particulièrement sensible chez les monocotylédons qui, parce qu'ils ne présentent pas de réseau vasculaire transversal important, s'organisent en systèmes longilignes de grande portée. Le pli y est le plus souvent la principale réalité constructive qui, en accord avec la résistance des matériaux, aménage une résistance par la forme.

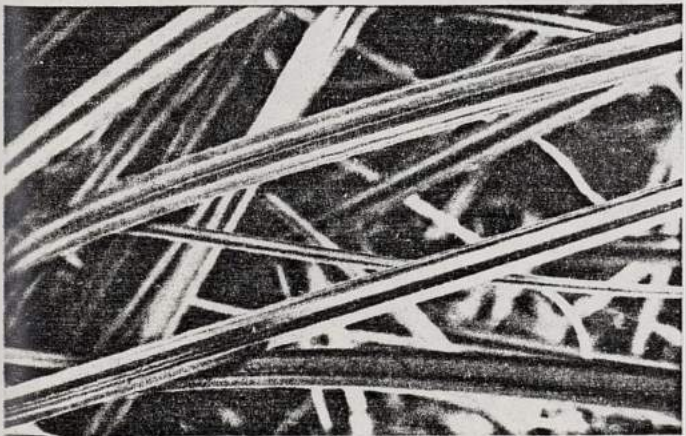
Le quasi parallélisme du réseau vasculaire impose ici des dispositions simples de plis qui s'apparentent fort aux formes des profilés industrialisés.



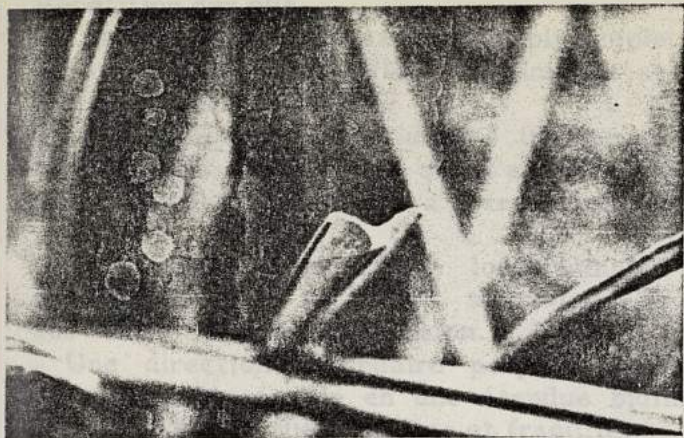
Chlorophytum. Le pli en V est, comme ici, l'archétype que l'on rencontre le plus souvent en des éléments longilignes, soumis à un effort de flexion simple. En toute section transversale, la partie supérieure est en traction, la partie inférieure en compression. La traction peut être aisément encaissée par la paroi libre (une surface travaille bien en traction, fort mal en compression, à moins d'être "spatialisée"); c'est ce que réalise judicieusement le pli dans la partie inférieure.

Aussi bien une telle forme ne saurait valablement exister selon une autre position, ce que l'observation courante confirme.

(D'autres principes structurants, qui n'appartiennent pas au pli sont aussi à l'œuvre : forme directement funiculaire qu'exprime le sens de la courbure, forme d'égale résistance qu'organisent les variations d'épaisseur et que traduit une constance de courbure longitudinale).



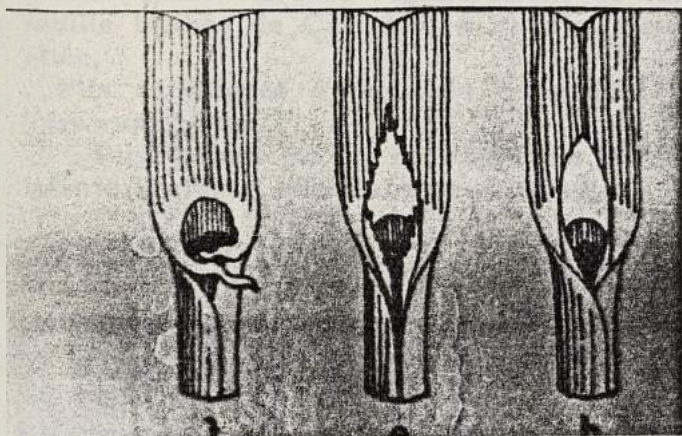
Laiche. Autre type de profil plus composite en V, qui participe des mêmes principes que précédemment. La présence de trois plis permet des lames beaucoup plus élancées et donc plus souples, et qui supportent sans dommage une inversion des contraintes. (Noter que ces profils n'offrent aucune résistance à la torsion).



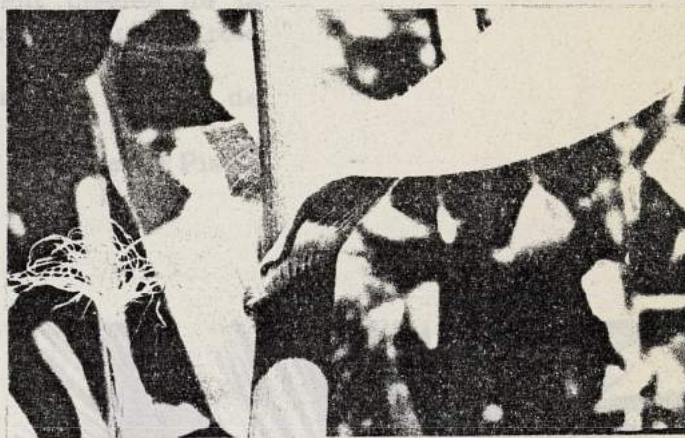
Feuille de crocus. Cette feuille, relativement lourde, trapue, est constituée d'une matière très tendre, qui vient renforcer une composition structurale assez élaborée : Le pli en créneau est complété d'une cloison qui réalise un caisson. L'"ame" de cette "poutre" est remplie d'une mousse alvéolaire qui prévient de l'éventuelle déformation des parois.



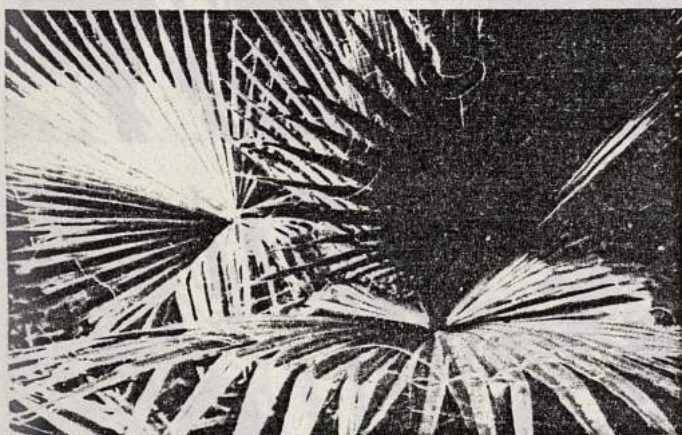
Coupe transversale d'une touffe de cypéracée. L'imbrication successive des dièdres est orientée selon une spirale phyllotaxique unique, distribuant par la base l'organisation aérienne des feuilles. On observe sur ces coupes des cloisonnements qui réalisent des caissons alvéolaires tubulaires, redoublant l'efficacité du pli et amenant une consistance locale assez importante en ces très longues feuilles.



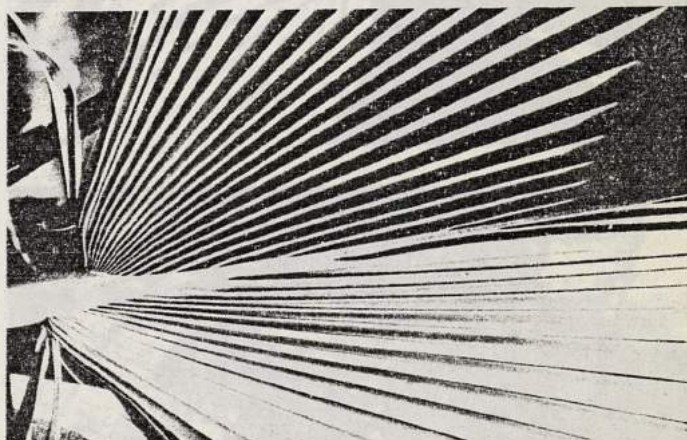
Graminées. Chez les graminées, chaque fourreau qui gaine le chaume se transforme soudainement en feuille aérienne au passage d'un pli curviligne. Cette transition spatiale s'effectue selon une section oblique quasi-plane, ce qui construit un liaisonnement assez résistant pour l'audacieux porte-à-faux du limbe.



Cette planche de morphologie botanique montre que cette disposition est caractéristique de l'espèce. Elle s'observe en toute son ampleur dans cette tige de maïs, haute graminée aux feuilles très développées.



Chamaerops. Ces éventails furent à l'origine fermés en quelque fourreau. Les plis correspondent aux directions des fibres qui constituent le tissu végétal. Lorsqu'après le déploiement total persiste quelque tendance à l'ouverture, la surface se déchire selon l'emplacement initial des plis. Ce lieu de déploiement total est fatalement une zone de faiblesse selon laquelle l'éventail de la feuille se brise (par pliage...)



Le détail de déploiement autour du rachis central montre que l'inertie décroît progressivement vers la périphérie de l'éventail, conformément au fait qu'elle s'avère de moins en moins nécessaire.

Répétition des plis

La juxtaposition systématique du pli simple engendre l'accordéon, et en généralise les effets mécaniques et structuraux dans une étendue bidimensionnelle.

Ceci aménage, en notre espace tridimensionnel, trois directions, orthogonales anisotropes qui s'agencent selon la normalité du plan vertical, prépondérant à notre échelle. On discerne :

- . Une direction principale longitudinale, propension première de croissance de la feuille, selon laquelle existe, grâce au pli, une résistance à la compression.

- . Une direction secondaire perpendiculaire, expansion latérale qui déploie la feuille en une étendue bidimensionnelle, et selon laquelle n'existe que souplesse et fragilité.

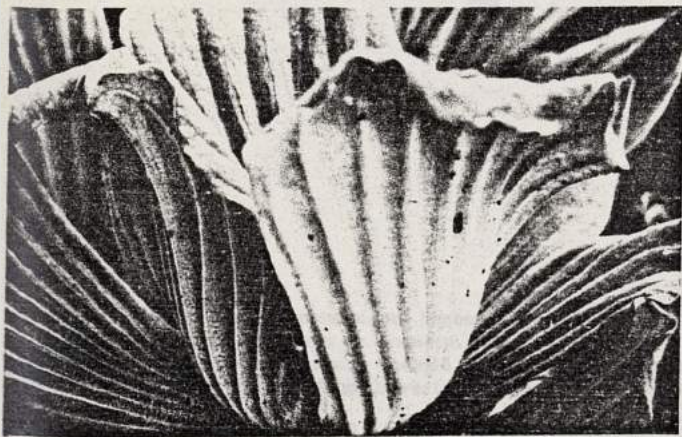
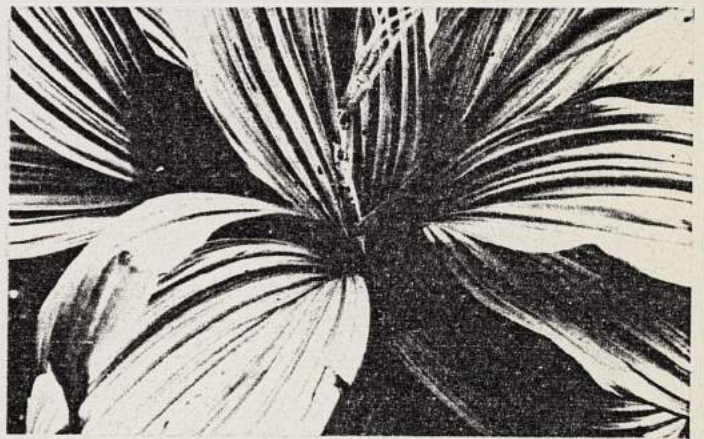
- . Une troisième direction perpendiculaire aux précédentes, où l'inertie du pli procure la résistance en flexion.

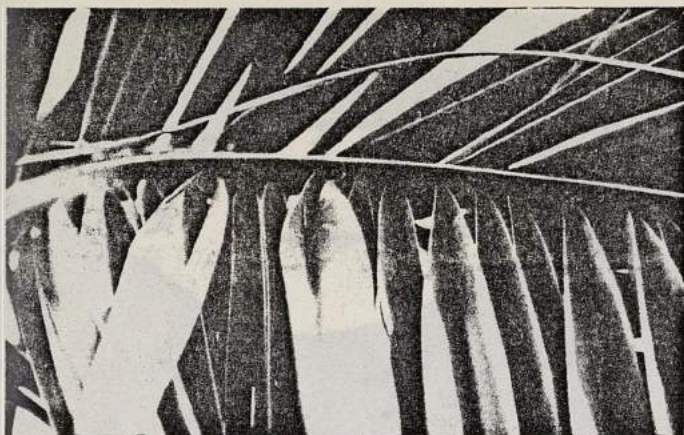
Ces données sont à conjuguer selon l'importance relative que revêt chaque direction, et selon la manière dont se réalise localement le pli en chaque espèce :

- . Membrane fibreuse régulièrement et finement ciselée de la feuille bilobée de *Carludovica Plicata*, aussi précise qu'une toile pliée.

- . Plis curvilignes d'amplitude irrégulière dans les feuilles de *Veratrum Album*.

- . Plis épaissis par les nervures dans la feuille charnue de *Pistia* (plante flottante, nécessairement basse).





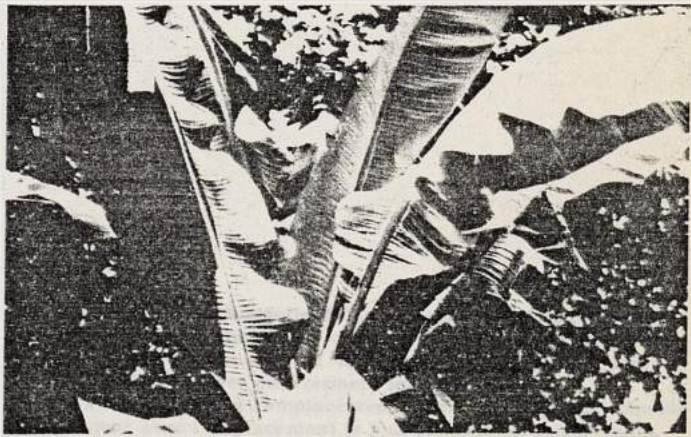
Bananier. Le limbe de cette plante herbacée géante, d'aspect arborescent, atteint deux mètres de longueur. Une simple "gouttière" centrale quelque peu surépaissie, est le seul élément structurant - Aussi le reste retombe et se déchire souvent ...

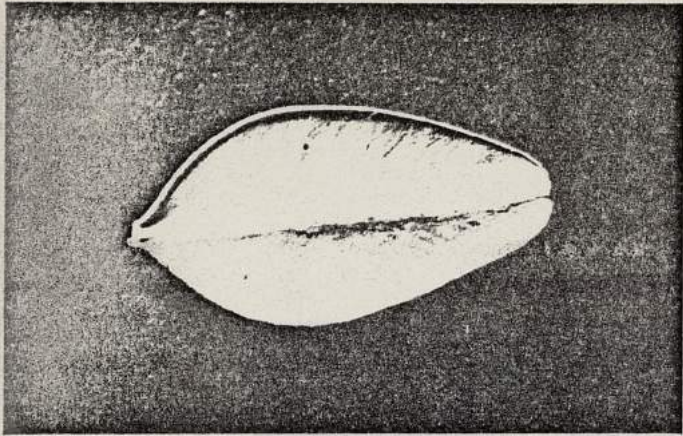
... dans l'axe latéral...
 ... d'une poutre centrale...
 ... d'inertie maxima...
 ... réceptive aux échanges énergétiques...
 ... charnières qui furent primitivement les rouages d'ouverture de ces gigantesques "plumes".

Détail de palme de dattier. Ces ramures sont de grande portée. Elles sont composées comme un système en porte-à-faux, constitué d'une poutre centrale, où s'encastrent des poutrelles secondaires. L'attache est le lieu le plus sollicité de la feuille : chaque limbe y est "pincé" selon un emplacement d'inertie maxima, qui s'ouvre ensuite progressivement pour offrir une surface encore résistante, réceptive aux échanges énergétiques. L'emplacement linéaire de l'attache constitue aussi une charnière d'accommodation aux perturbations qui ne manquent pas d'affecter d'aussi grandes ramures (charnières qui furent primitivement les rouages d'ouverture de ces gigantesques "plumes").

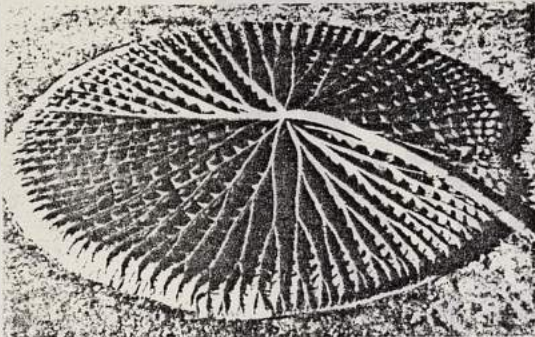
... de l'axe central...
 ... par un jeu de cannelures...
 ... on constate la grande mollesse du limbe qui pend.

Phylodendron. La structuration de cette vaste feuille ne s'accomplit que par un jeu de cannelures dans l'intervalle desquelles on constate la grande mollesse du limbe qui pend.





Buis (face inférieure). Cet arbuste possède des feuilles persistantes, donc forcément résistantes. En plus de la nervure centrale, un pli perpendiculaire au limbe est imprimé à la limite de cette feuille et tel un ourlet, réalise un renfort en une matière déjà bien consistante.



Face inférieure de Victoria Régia. Cette feuille de nénuphar géant atteint deux mètres de diamètre. Grâce à l'imposante nervuration inférieure, elle supporte le poids d'une personne. Mais c'est aussi dans leurs conditions aux limites que les surfaces trouvent la résistance : le rebord qui fait cuvette constitue encore une rive consolidatrice.

Fig. 2 Fine-membered structure in nature: *Victoria regia* leaf
Model for the Crystal Palace

concepts, but this ingenious fine-membered struc-

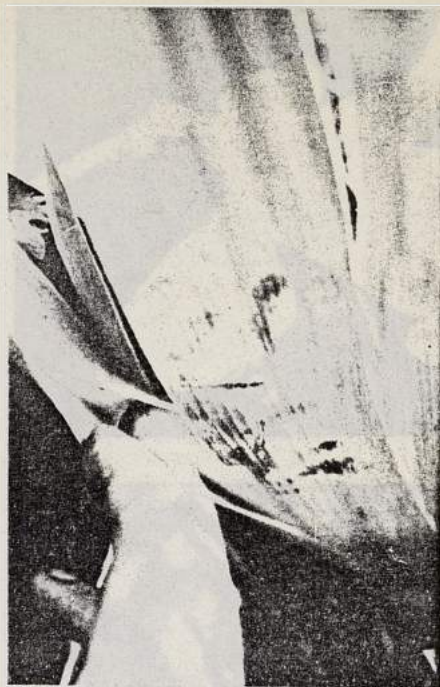
Contenance

Un même type de pli sait conjuguer différentes manières de structurer : l'orientation spatiale contentive que forme le dièdre du pli établit des imbrications spatiales qui sont par essence solidarisantes.



Souche de lin de Nouvelle Zélande. Selon l'alternance régulière de la préfoliation équitante, chaque feuille s'insère dans celle d'en face, ce qui construit à la base un massif solide pour de longues feuilles plissées qui voisinent les 2 m. Noter la surépaisseur à l'emplacement même du pli ce qui coïncide logiquement avec l'emplacement le plus sollicité en compression.

Pied d'iris. Les feuilles d'iris, assez hautes lames, ne sont cependant rigidifiées d'aucune nervure ; elles doivent donc demeurer dans une position proche de la verticale pour ne pas fléchir : un repli intérieur, situé à la base des feuilles, solidarise chaque feuille en un ensemble globalement résistant.



Bourgeon de lilas. Les feuilles, pliées, sont totalement imbriquées l'une dans l'autre, tel l'appareillage d'un mur de briques. Il ne s'agit pourtant pas là d'effet structurant, des feuilles aussi petites n'ont quasiment pas d'effort à subir et seront d'ailleurs bien vite dépliées.

Le pli réalise surtout une contenance protectrice, les deux feuilles extérieures enveloppant totalement les suivantes et ainsi de suite, préfigurant dans le bourgeon la disposition opposée décussée que les feuilles occuperont au long de la tige - et qui organisera aussi chaque embranchement.

Fleurs

L'éclosion relativement rapide de la fleur met souvent en jeu le mécanisme de dépliage des pétales, fines membranes initialement compactées dans l'enceinte étroite du bouton.

Etant donné leur rôle éphémère et leur taille modeste, ces pétales ne nécessitent pas de constitution complexe, alors consommatrice d'énergie, et ils trouvent généralement leur robustesse directement par leur distribution de courbure ; le pli n'apparaît guère comme facteur consolidant que dans les pétales de grande taille ou les parois très fines.

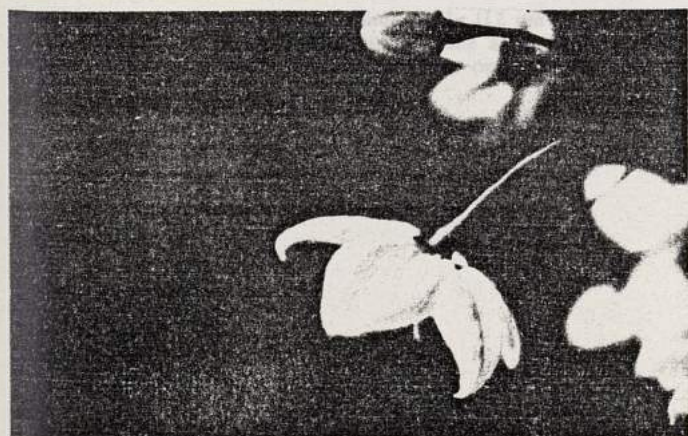


Pétales de tournesol. Le pli est évidemment structurant dans ces surfaces développables allongées, voisines de 12 cm.

Narcisse. Les plis consolident la limite libre du tube et aménagent un évasement qui favorise la visite de l'insecte.

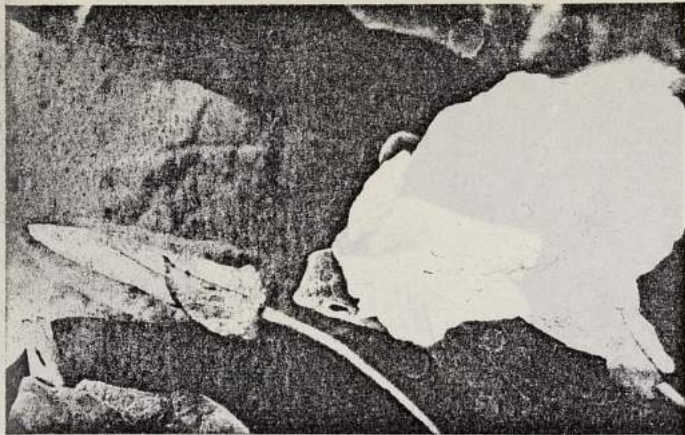


Campanules. L'éclosion des campanules se réalise par déploiement latéral de la paroi tubulaire. Lorsque la fleur est petite, les plis disparaissent après éclosion. Les plis subsistent pour les corolles d'assez grande taille (ils marquent naturellement l'extrémité des saillies et des échancrures, pour des raisons d'ajustement symétrique des lèvres obturatrices à la préfloraison).



Solanacée. Bien que sa petite taille ne le nécessite pas, cette fleur gamopétale est néanmoins étonnamment structurée par le pliage accordéon qui a guidé l'éclosion, disposant successivement :

- . un pli raidisseur dans l'axe des pétales.
- . une paroi de refend perpendiculaire à la convexité générale de la corolle.
- . une charnière rentrante d'ajustement.



Liseron. Le pli est parfois l'acteur d'une mécanique périodique. Maintes fleurs s'ouvrent et se ferment selon l'alternance des activités diurnes et nocturnes, comme ces présentes fleurs de Liseron (bouton en voie d'éclosion et fleur épanouie).

La surface à double courbure inverse de cette assez grande corolle lui procure une résistance appréciable à quoi concourt aussi sa disposition limitrophe (une surface délimitée par une courbe plane dont le plan est tangent à son support, est indéformable). Néanmoins, une telle fleur s'ouvre et se referme : un subtil jeu "accordéon" de plis curvilignes torsadés s'enroule et se déroule. Ce système marque la lisière de la corolle d'un feston de saillants et rentrants caractéristiques.



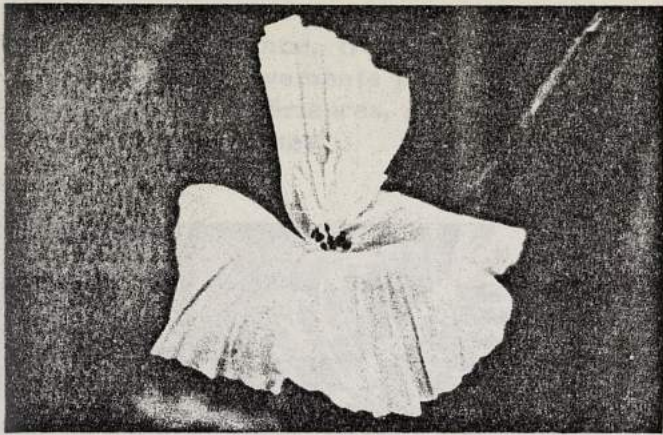
Datura. Principes voisins de plis "accordéons" curvilignes orientés en cette lourde cloche.

Observer ici la limite de la corolle fermée qui, tel un diaphragme, s'ouvre et se ferme comme une étoile pliante spiralée.



Clématite. La fleur est de grande taille (12 cm de diamètre). Elle éclôt selon un mécanisme qui se forme à la limite du "dur" et du "mou" (Portion externe durcie, protectrice, domaine interne tendre, protégé).





Escholzia. Les pétales faiblement plissés et fragiles confectionnent une robe éphémère et gracile.



Hibiscus et Cobée. La fécondation accomplie, les pétales, vivres coupés, se dessèchent et se chiffonnent. Les sépales, plus résistants que les pétales qu'ils ont protégé et délivré par dépliage, ne tombent pas. Ils se plient à nouveau pour protéger provisoirement l'ovaire deshabillé, jusqu'à maturation du fruit.



Passiflore. Déferlement de replis annulaires autour de l'ovaire fertilisé de la fleur de Passiflore.

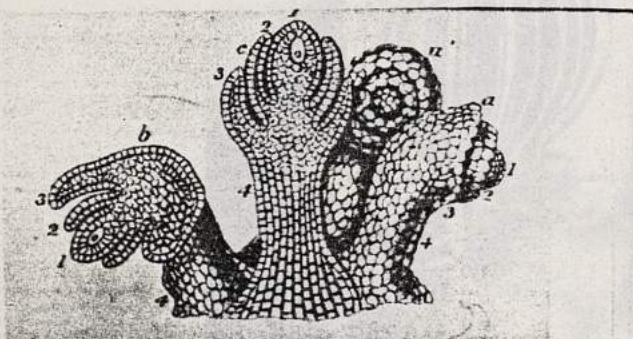
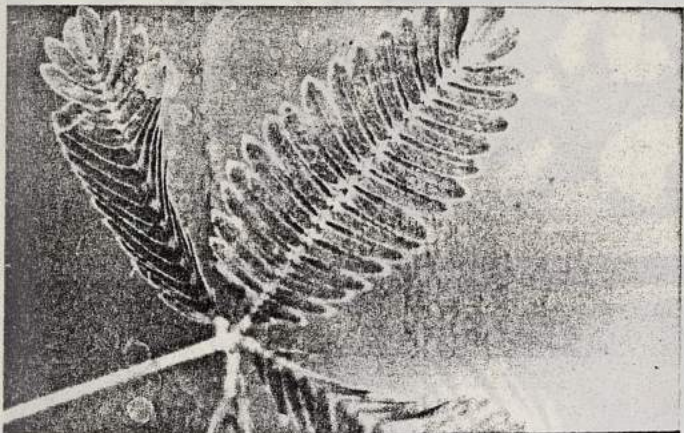


Figure 4 The seed bud of *Passiflora*, cross-sections in which arrays of cells arranged around the fertilised ovum reveal successive stages of growth.

Mouvement

Hormis la croissance, très lente, les végétaux sont fréquemment soumis à des mouvements plus rapides d'adaptation aux variations des conditions extérieures, généralement climatiques ou occasionnellement mécaniques.

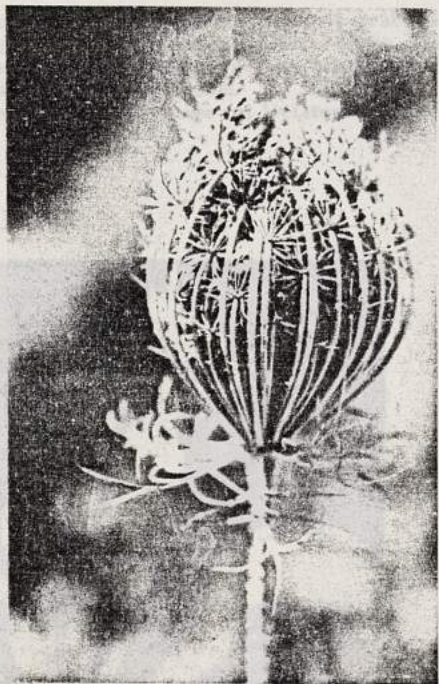


Mimosa pudica. Sur cette plante, appelée encore sensitive, un choc déclenche la rupture du système de régulation des pressions qui la maintenait en place, à la manière d'un bras articulé mu par pistons hydrauliques.

Selon l'importance de la secousse, la plante se replie comme ici au niveau des articulations du limbe, puis au niveau des pétioles, voire encore à chaque embranchement de la plante qui s'affaisse alors totalement.



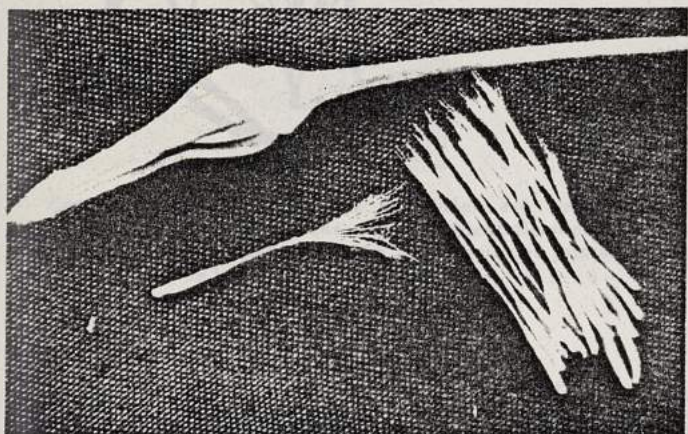
Oxalis. L'oxalis est une plante de sous-bois qui craint le soleil, grand buveur d'humidité. Qu'apparaisse un rayon de soleil et la feuille se replie, comme un parasol trifolié que l'on ferme. Chaque limbe en forme de cœur se plie selon l'axe qui s'abaisse au long de la tige, pour ne plus présenter au soleil que des plans "sur la tranche".



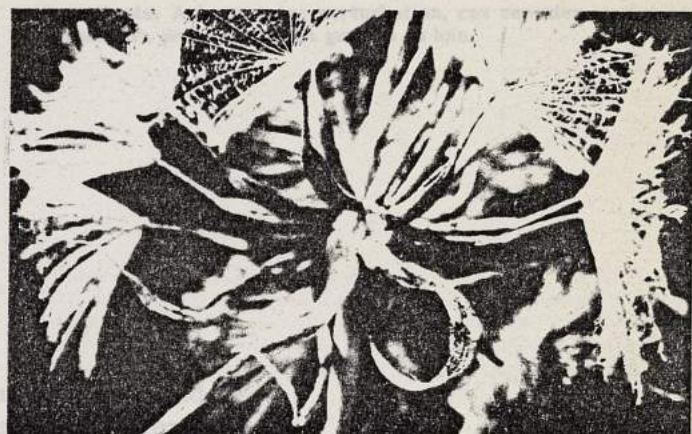
Carotte sauvage. Après s'être déployés au soleil, les pédoncules de cette ombelle de carotte sauvage se recroquevillent durant la période de murissement des graines pour s'ouvrir de nouveau peu après, et permettre leur délivrance.



Rhododendron. Comme des bilames qui jouent selon la dilatation différentielle de leurs matériaux constitutifs, ces feuilles s'enroulent en cigare lors des chaleurs desséchantes.



Salsifis sauvage. Lorsque les sépales de la fleur de salsifis s'ouvrent à nouveau après la période d'incubation des graines, ils délivrent de leur étroit fourreau des "parachutes" repliés de manière telle qu'ils se dessèchent par l'extérieur, et s'ouvrent alors bientôt à l'aventure.



Abutilon. La déhiscence de ces follicules survient grâce à l'anisotropie de leurs parois. Elles sont constituées comme des contreplaqués à strates fibreuses croisées qui se contraignent irrégulièrement par dessèchement et se ploient. La disposition en "accordéon étoilé" aménage cet "éclatement".

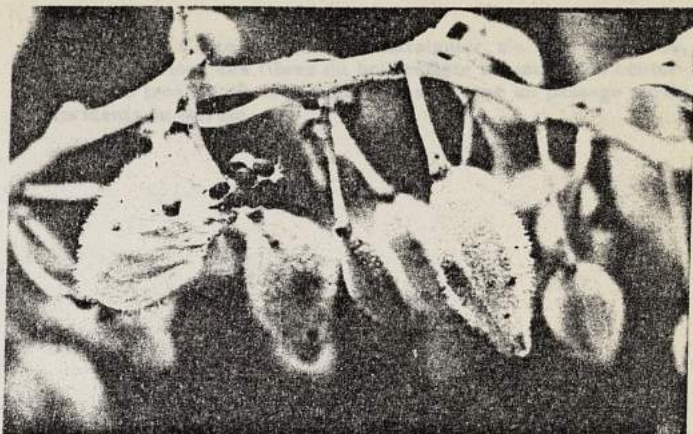


Dionnée. La Dionnée est une plante carnivore. Sa "bouche" est un pli béant qui se referme brusquement sur l'insecte qui le frôle.





Orge. Le chaume rigide des graminées est "articulé" aux nœuds. Lorsque ces hautes plantes sont accidentellement abattues, une prolifération cellulaire adaptée au niveau des joints permet un redressement de la situation par "pliage".



Impatiens. A la moindre perturbation, ces capsules se ploient soudainement, projetant leurs graines au loin.

Perturbations

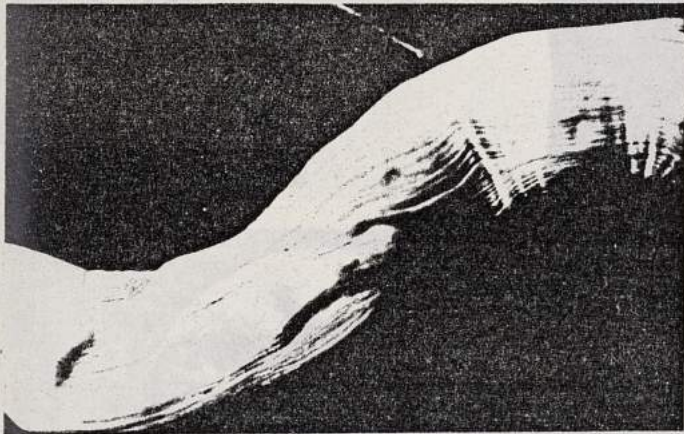
Sans qu'ils puissent être attribués à des raisons autres qu'accidentelles, des plis apparaissent souvent en divers emplacements de la plante, témoignant de quelques perturbations qui ont affecté le déroulement normal de l'existence.

Une surface, en tant qu'élément mince, résiste bien en traction, mal en compression. Apparaît alors le phénomène de flambage local, qui se manifeste par des plis perpendiculaires à la direction de compression, comme en ces feuilles dont la croissance longitudinale a été perturbée (iris et acore).





Bois ployé. Cette souche de châtaignier n'a pas été pliée, mais le va-et-vient des fibres du bois reflète les multiples contorsions que le tronc a dû effectuer pour se frayer un passage parmi les accidents du terrain.



Racine. Cette racine de conifère, séchée, est étonnamment légère et résistante. On ne peut la considérer comme pliée que pour les mêmes raisons d'itinérance qui précèdent. C'est l'ancêtre naturel du bois ployé, principe constructif qui réalise des performances remarquables par la cohésion latérale des fibres.



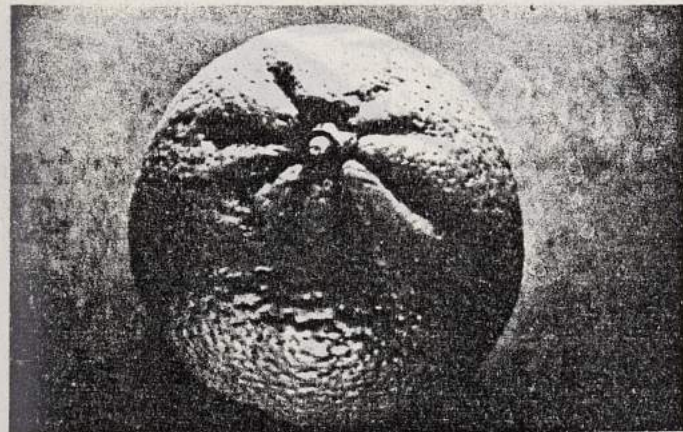
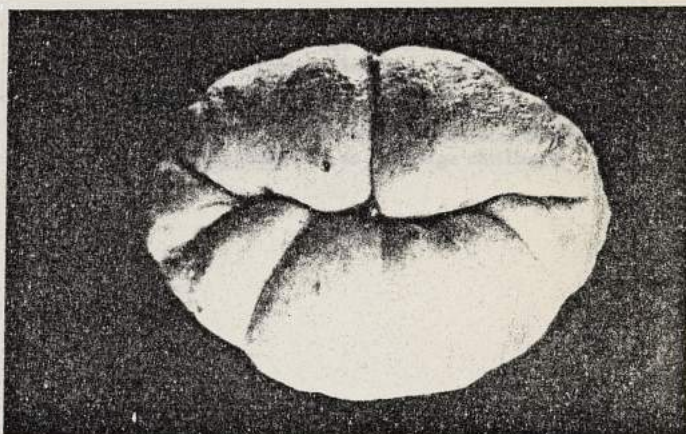
Herbacée. Bien des insectes se construisent des abris par découpage et pliage de feuillage :
Ce simple pli en zigzag, habilement ficelé, aménage une chambre à trois parois où l'araignée loge ses œufs.

Boursouflures

Les replis qui apparaissent en maintes espèces de fruits peuvent être occasionnés :

- . Par de simples différences de production cellulaire qui engendrent des hypertrophies locales (pomme et chayotte)
- . Par des contraintes superficielles qu'engendrent des surpressions directionnelles internes (écorce d'orange).
- . Par des tensions centripètes qu'exercent les cloisonnements intérieurs du fruit, et qui retiennent la propension à l'expansion (poivron, tomate).

Ces actions peuvent aussi se conjuguer entre elles.



Fanage

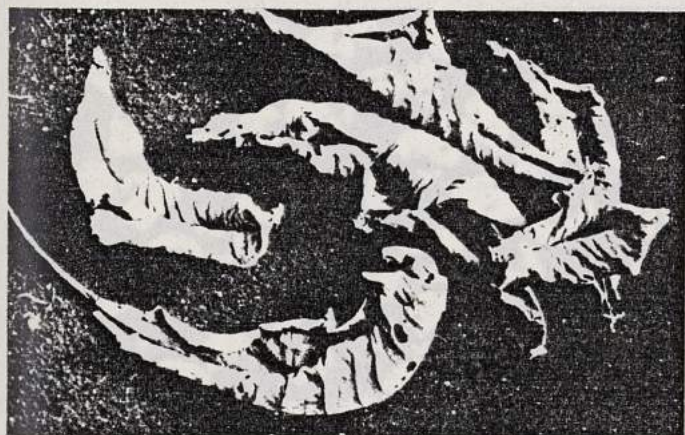
Quand cesse l'irrigation nourricière désormais inutile, la feuille se dessèche. Cette dessiccation provoque un rétrécissement des membranes celluloses très hydrophyles qui constituent les tissus.

C'est l'ordre selon lequel cesse l'irrigation, ainsi que la différence de consistance entre les nervures et les parois qui orchestrent l'accomplissement du processus générateur de plis.

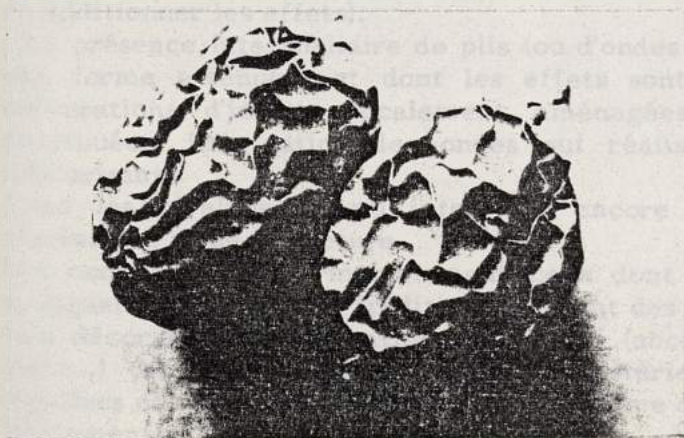
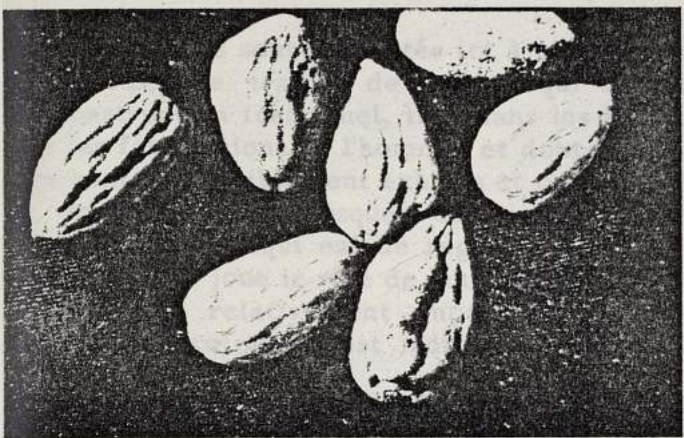
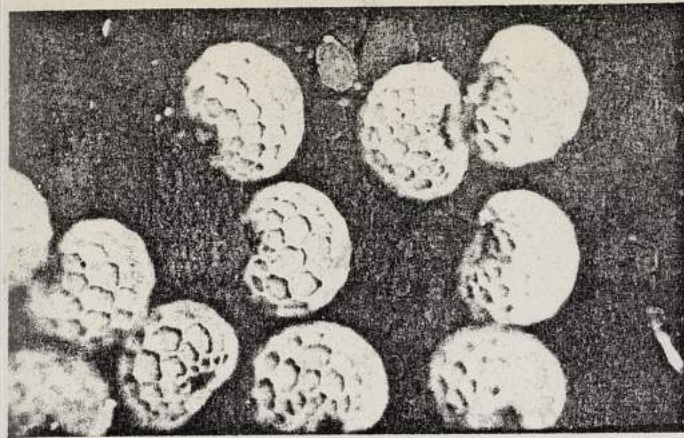


Chataignier. Le pli, par ses facultés de contenance et de dissimulation offre un abri à l'insecte, prolongeant la symbiose qui unit étroitement le végétal à l'animal.

Ces convulsions assez désordonnées sont si familièrement associées à la mort que cela induit probablement la connotation dévalorisante que l'on attribue généralement à un froissage chiffonné.



Polypode. Les feuilles, qui poussent par l'extrémité périphérique, voient aussi leur dessiccation commencer à cet emplacement. Puisqu'il se déroule dans l'ordre inverse de la croissance, ce jeu engendre dans la mort un retour aux formes originelles.



Dessèchements

La dessiccation des graines est extrêmement importante (une graine peut ne plus posséder que le centième de sa teneur initiale en eau).

Cette concentration, qui s'accompagne de transformations chimiques, est le garant de la conservation. Elle s'accompagne d'une contraction qui a parfois pour effet de rendre les graines indépendantes, ce qui favorise leur dissémination (coquelicot).

En vertu des variations du rapport surface/volume selon la taille, ce dessèchement est plus rapide et complet chez les petites graines que chez les grandes, ce qui fait que celles-ci sont empreintes de reliefs relativement plus marqués.

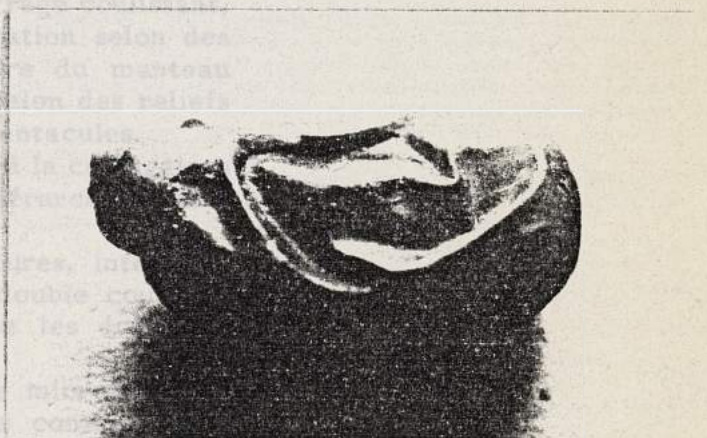
Ces reliefs plissés du tégument expriment les directions prépondérantes de contraintes superficielles, et qui correspondent régulièrement aux directions des courbures principales.

On observe plus aisément sur les fruits importants l'anastomose des plis : ils gravent une configuration de repliabilité minima, en des formes localement dérivées de la fronce (trois plis saillants autour d'un nœud) en conformité avec la logique du pliage curviligne.

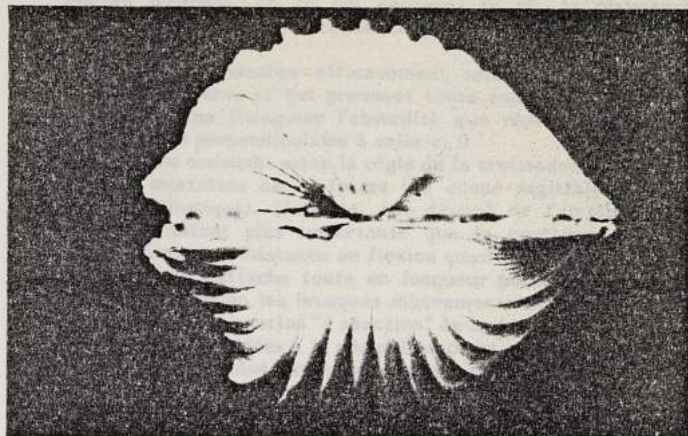
L'influence des directions de courbure y est là encore sensible : il y a davantage de plis perpendiculairement à la direction de plus grande courbure, celle qui "travaille" le plus.

Il faut bien sûr admet qu'une telle transformation tolère des variations locales d'étendue et des déplacements de plis sur la surface, conditions sans lesquelles une surface convexe, entièrement close, est indéformable.

Noter l'extrême expressivité de ces rides (affirmation des traits de caractère, vieillesse flétrissante).



COQUILLAGES



Les coquillages sont présentés ici à cause de leur caractéristique structurale, le travail de coque, qui constitue un archétype de construction fort usuel, tant dans les réalisations de la nature que les fabrications de l'homme, et dont les principes de composition sont ici tangiblement exhibés et concrètement éprouvables.

La coquille des mollusques constitue le squelette externe de ces animaux, ce qui est de règle pour des organismes de taille modeste. Elle joue le rôle de bouclier protecteur, qui doit résister à des chocs relativement importants en fonction de la taille (Une telle protection est indispensable étant donné leur faible vitesse de fuite).

Il ne s'agit bien sûr pas de constructions plissées au sens propre du terme : la matière n'a assurément pas été initialement étalée et pliée ensuite, mais comme un moulage par coffrage coulissant, elle a été directement conformée par cristallisation selon des ondes qui correspondent à la forme particulière du manteau qui secrète cette coquille par sa périphérie, et selon des reliefs qui parfois aménagent le passage de palpes ou de tentacules.

L'efficacité structurale de ces constructions tient à la conjugaison de trois facteurs qui interviennent à des niveaux hiérarchiquement distincts :

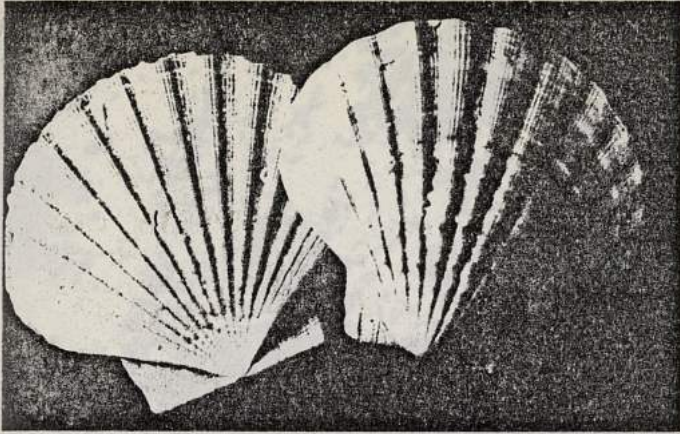
- . Le travail global de coque, qui tient aux natures, intensités et distributions de courbure (Le convexe et la double courbure inverse étant notablement plus performants que les domaines développables dont on note l'absence régulière).

- . 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 intermédiaire 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.

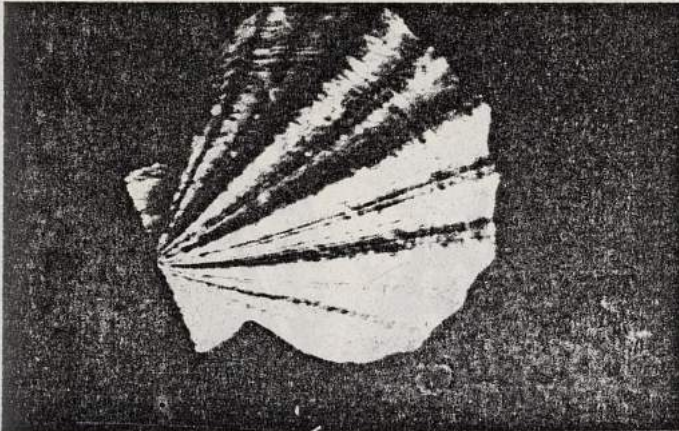
Chez les bivalves, le pli intervient encore comme charnière d'ouverture et de fermeture.

Les coquillages, et principalement ceux dont les reliefs plissés soulignent le dessin sont traditionnellement des sujets de composition décorative à connotation symbolique (abondance, fécondité, mort...) tant ces objets apparaissent mystérieusement parfaits, réguliers et résistants, comme la pierre même qu'ils reconstituent finalement.

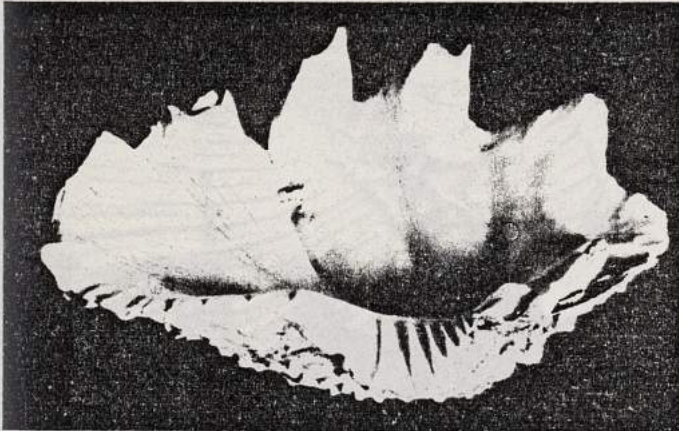


Pecten jacobaeus. En ce qui concerne le pli, la résistance de cette coquille Saint-Jacques tient principalement à trois facteurs :

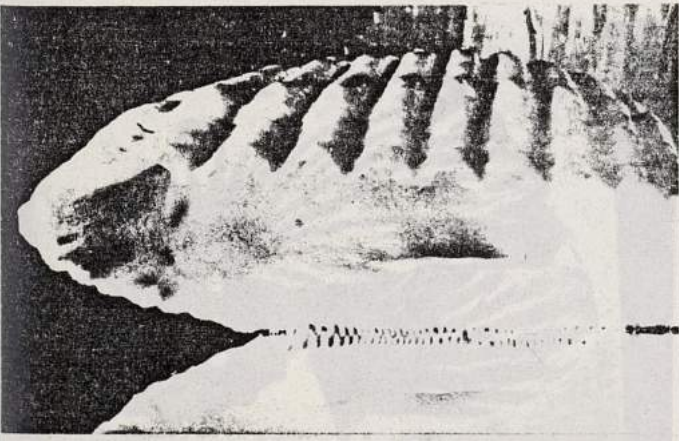
- . Ondes d'inertie situées efficacement selon la direction de plus faible courbure, et qui prennent toute souche à l'emplacement de l'attache (imaginer l'absurdité que représenterait une direction de plis perpendiculaire à celle-ci !)
 - . La coquille se construit selon la règle de la croissance semblable, par simple dilatation de la forme (La coupe sagittale est une spirale logarithmique). L'inertie, qui dépend de l'amplitude de l'onde, est d'autant plus importante que la courbure est plus faible, amenant une résistance en flexion quasi constante.
 - . Une charnière d'attache toute en longueur permet d'effectuer sans risque de torsion les brusques mouvements de "castagnette" qui produisent la locomotion "à réaction" de ce bivalve.
 - . L'"engrenage" des ondes à la périphérie constitue une fermeture résistant au moment des forces de "dévissage".
- C'est une variation de ces divers principes en vue de l'obtention d'une résistance adaptée qui s'organise chez différents bivalves.



Faux peigne flectueux. Ainsi qu'en de nombreux profils nervurés industriels, le profil transversal de cette coquille présente une alternance régulière d'ondes telle que la faible amplitude de l'une est compensée par l'importance de sa voisine, pour l'obtention d'un effet global intermédiaire.



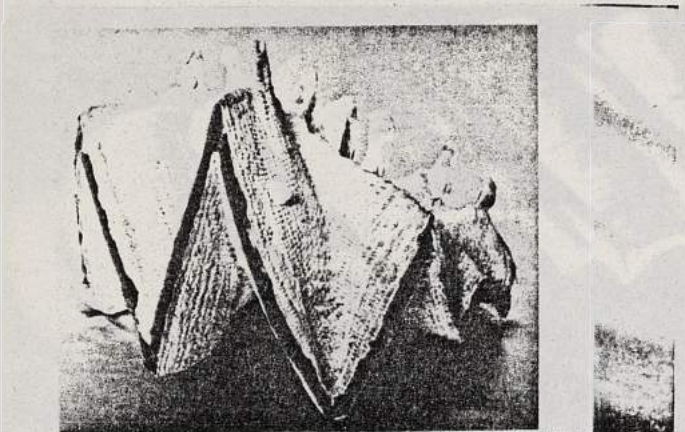
Bénitier. Cette coquille compte parmi les plus grandes. Même sans pli, elle serait, par sa seule épaisseur, extrêmement résistante. L'attache y est cependant un emplacement d'autant plus vulnérable qu'il est relativement restreint. Des cannelures y assurent certaines cohésions et guident les mouvements d'ouverture. En même temps que l'imbrication des fortes machoires limitrophes, elles empêchent les distorsions "en vis". Le pliage ne fait pas directement partie d'un "ordre" génétique : est seulement programmée une prolifération excédentaire de matière à la périphérie, qui s'organise alors en plis.



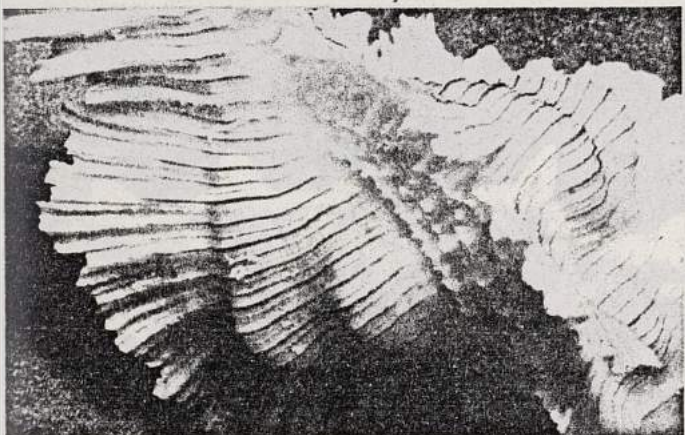
Arche. C'est surtout la longue charnière dentelée, obligatoirement rectiligne, solidarissant étroitement chaque valve qui est ici remarquable.



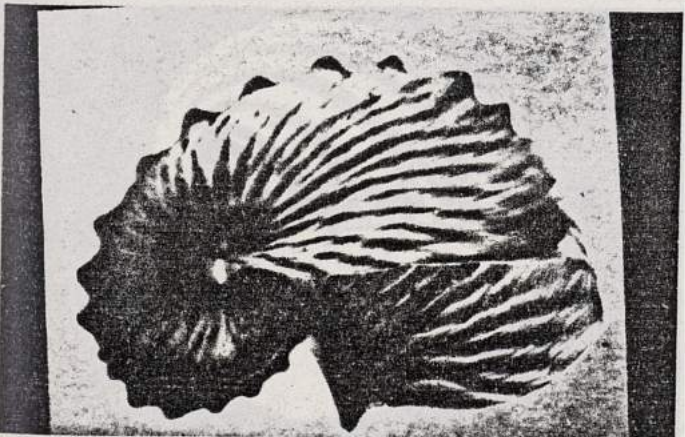
Patelle. La forme de ce coquillage est un cône, surface vulnérable parce que développable : des plis sont judicieusement placés selon la direction de plus faible courbure des génératrices rectilignes. Les plis sont parfois sollicités en compression en fonction de la section triangulaire qui constitue un schéma statique globalement performant.



Lopha. Ces mêmes données s'observent en différentes espèces d'huitres. Celle-ci est composée d'un remarquable pliage en éventail. La faible épaisseur du matériau et la vulnérabilité des parois quasi-développables qui la constituent sont compensées par de fortes amplitudes de plis.

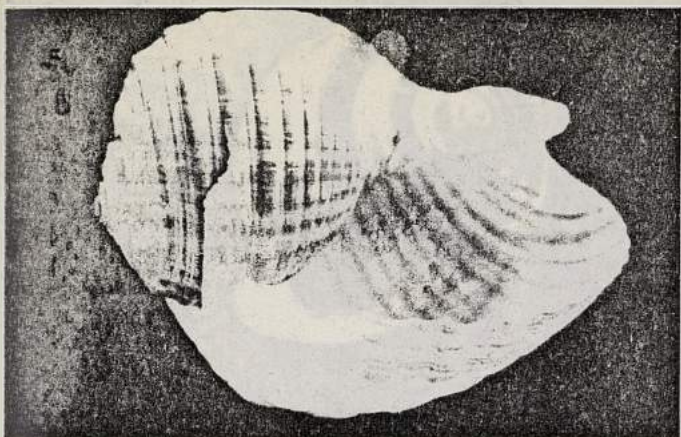


Murex. La persistance de ces fines parois, véritables dentelles, ne tient qu'à leurs subtils plissements.



Nacelle d'argonaute. La résistance de cette frêle paroi calcaire translucide finement ciselée participe des effets déjà décrits ailleurs. (Ce n'est pas une coquille, mais le réceptacle qui abrite provisoirement les œufs de ce mollusque céphalopode).

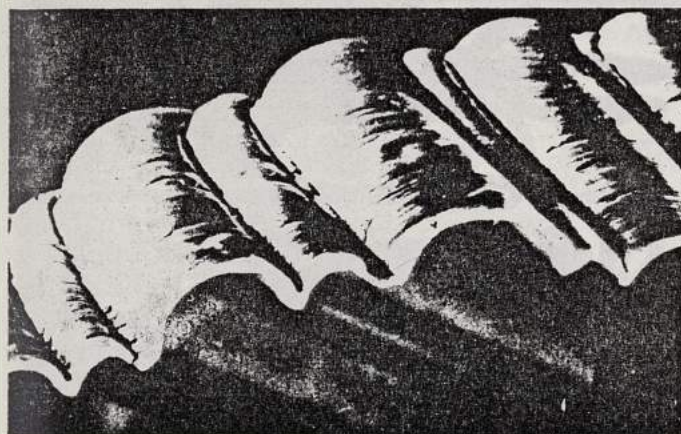




Tonne. Cette coquille est fine (1/2mm), grande (28cm d'axe, 25cm de diamètre) et légère (175 grammes). C'est une parfaite tôle ondulée, étonnamment résistante, presque transparente.

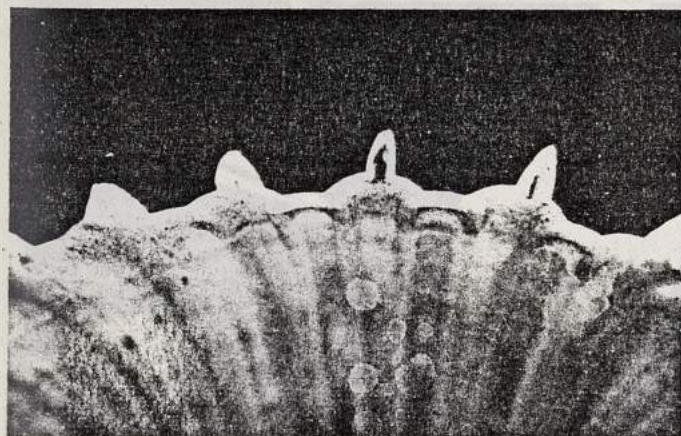
On observe selon l'espèce divers types de profil, constitués d'ondes curvilignes qui suivent la direction de croissance.

De larges cannelures s'appuient ici sur de plus petites au passage de plis nettement marqués. Elles réalisent des accumulations locales de courbure consolidatrice dont l'effet se superpose à la courbure de la structure globale du coquillage.



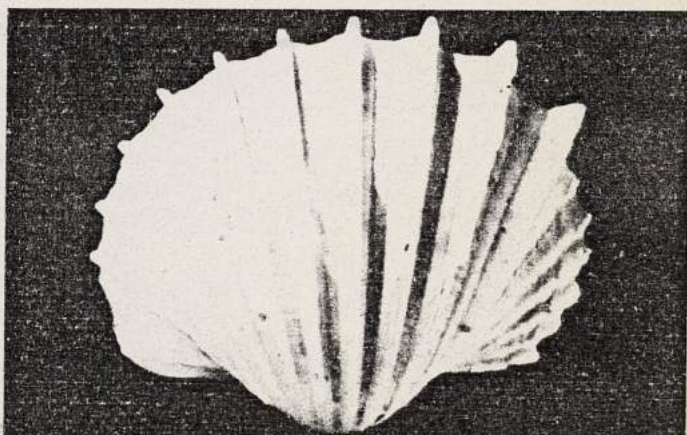
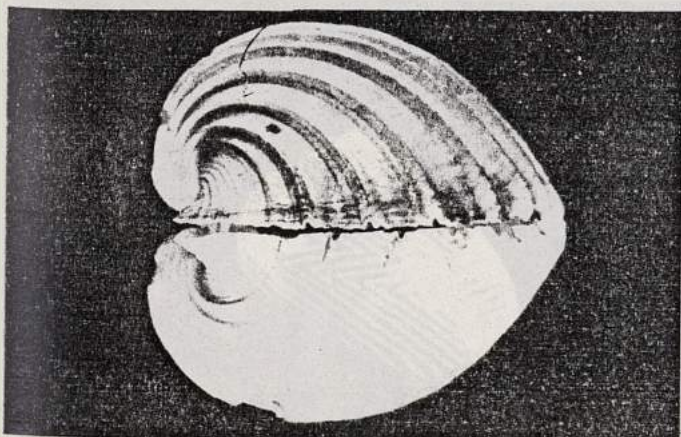
Cardium costatum polytypique, tel la *Tonne*, est une coquille légère.

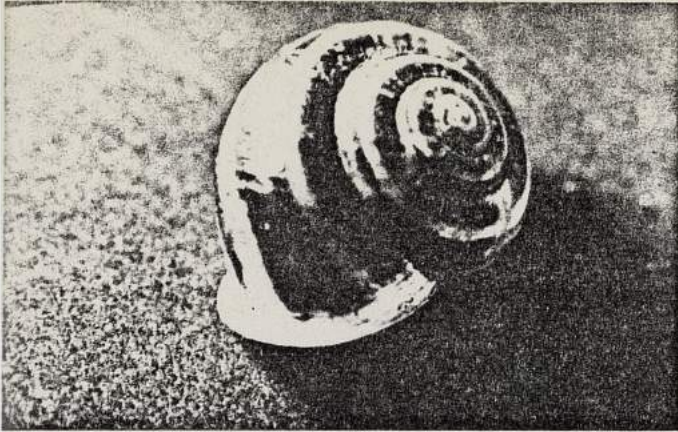
L'aspect de "tôle" ondulée d'origine est renforcé par la présence de cannelures secondaires de ce calibre au tiers de hauteur qui assure la stabilité de la structure. Elles sont donc des plis nettement effacés au cours de la croissance. Elles sont donc des plis nettement effacés au cours de la croissance.



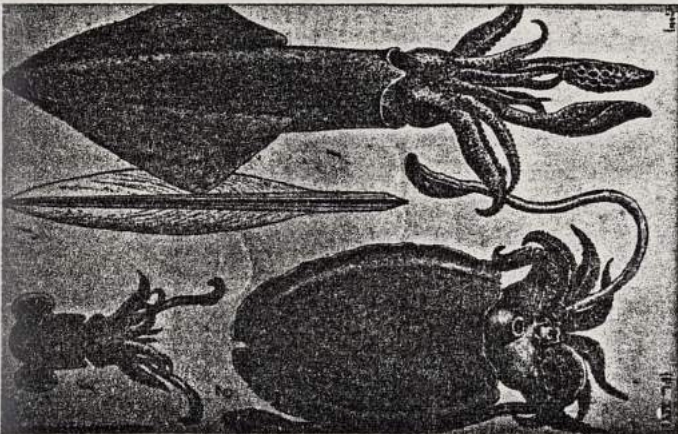
Cardium costatum. La structure légère des parois de ce coquillage est assez élaborée, doublement renforcée:

- . Par un profil primaire ondulé/crénelé.
- . Par un long relief triangulaire creux au dièdre acéré, qui effectue un travail de caisson tubulaire curviligne.



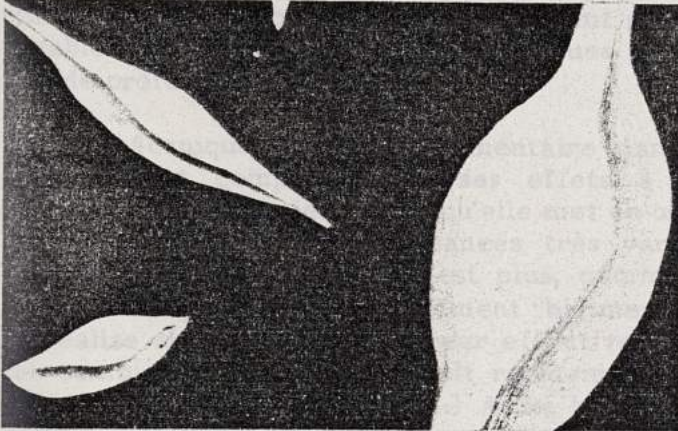


Escargot. Cette coquille de gastéropode est très mince. Une telle disposition de pli à la limite de la surface empêche d'une part toute déformation mécanique et procure d'autre part une résistance aux efforts perpendiculaires à la paroi, toujours assez vulnérable à cet emplacement. Ceci dispose encore une gorge de transition spatiale non coupante qui accompagne les mouvements du corps.

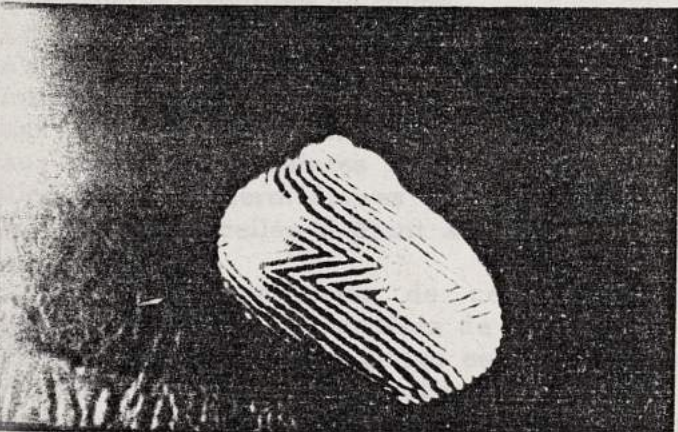


Calmar. Certains mollusques, tel la Seiche, ont une coquille interne.

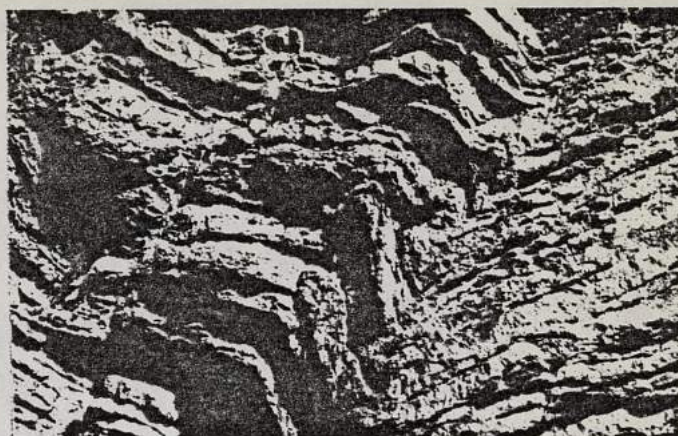
L'espèce de "plume" transparente d'épaisseur quasi constante qui constitue le squelette interne de ce calmar ne tire sa raideur que d'une gorge axiale. Etant donné son profil, elle n'est efficace en cette masse de chair molle qu'en flexion longitudinale et en compression axiale.



Volva. Ce sont les "replis" internes de ces enroulements qui constituent le seul ancrage du corps tout mou de ces mollusques - attestant ici que le pli est encore structurant par contenance et imbrication.



Natica. Etrange motif évoquant fortement le pli sur cette coquille en fait toute lisse.



GEOMORPHOLOGIE

A des échelles géologiques, qui concernent des durées et des étendues considérables, les poussées énormes qui occasionnent la dérive des continents provoquent localement des accidents de relief par plissement de l'écorce terrestre. Apparaissent des chaînes de montagnes, se dessinent crêtes et vallées, se disposent les gisements minéraux, se sculpte la forme intime de la roche... Ces effets se manifestent sur des dimensions allant de plusieurs milliers de kilomètres à quelques fractions de millimètre.

Une telle connaissance de l'orogénèse est importante parce que, de l'explication du passé (et le pli en tous ses accidents est là une mémoire tangible des interactions) se comprend le devenir, se repèrent les gîtes minéraux, se prévoient les épiphénomènes catastrophiques de type tremblement de terre qui accompagnent la "mise en pli" ...

Ces domaines de la géomorphologie, étudiés depuis un siècle, connaissent un essort relativement récent grâce au progrès considérable des moyens d'observation (vues aériennes, sondages à grande profondeur, échographie).

Cette mécanique des sols, élémentaire dans ses principes, est extrêmement complexe dans ses effets à cause de l'ampleur des échelles impliquées, parce qu'elle met en œuvre des composants fort hétérogènes, des consistances très variées, des matériaux anisotropes... Parce qu'elle n'est plus, comme à la surface d'une feuille, un phénomène uniquement bidimensionnel, mais qu'elle se réalise au sein d'une épaisseur effectivement tridimensionnelle (et combien la complexité croît rapidement par passage de l'uni en bi puis tridimensionnel ! ...) Aussi bien pour voir clair en ces épaisseurs opaques faut-il considérer ces effets tant en plan qu'en toutes directions de coupe.

Le poids des masses soumises à la gravité écrase le relief qui n'a plus la netteté d'un habituel froissage.

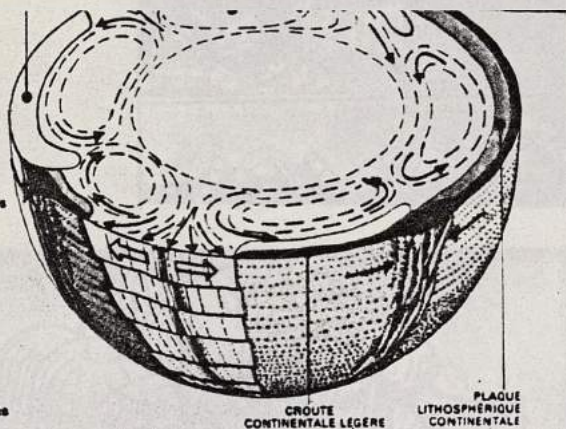
Intervient encore la résistance des matériaux, où la distribution des forces, même en milieu homogène, est déjà complexe, associant aux axes de contraintes normales (compression, extension) des directions intermédiaires de contraintes tangentielles (cisaillement), celles-ci étant aussi agissantes que celles-là quant à la tectonique.

Aussi la compréhension de ces phénomènes nécessite-t-elle l'expérimentation sur modèles de simulation, où la connaissance des lois intrinsèques du pliage est une base fondamentale, même si celui-ci n'est effectivement pas la seule modalité de transformation agissante, qu'il faut conjuguer avec extensions, contractions, déchirements, glissements.

Au-delà d'une connaissance strictement mécaniste des phénomènes telluriques et de leur utilité pragmatique, c'est une sensibilité accrue aux caractéristiques d'un site, une intimité avec les réalités de la matière et de ses "cuisines", une conscience plus globalisante des effecteurs morphogénétiques qui peuvent être le fruit d'une telle observation.

Le but ne consiste pas à brosser ici un tableau résumé de la grande complexité des phénomènes tectoniques, mais plus modestement de montrer dans quelques situations types comment le pliage et ses règles participent à leur compréhension.

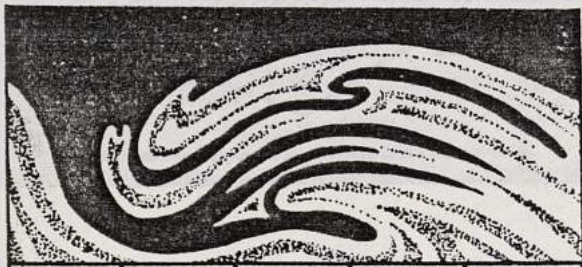
« Terre et la tectonique des plaques. Les limites des plaques évoluent avec l'approchement ou l'écartement, d'où la naissance de chaînes de montagnes et l'ouverture de nouveaux océans. Les mouvements des plaques sont dus à des courants de convection dans l'aesthénosphère.



Chaînes. Par la tendance universelle à l'entropie, toute différence engendre des interactions, d'où les inévitables mouvements de convection au sein du magma terrestre, qui tend à se refroidir en réchauffant l'environnement. Ces transferts et apports de matières provoquent des expansions superficielles qu'il faut bien, sur une surface finie, compenser quelque part par contractions et replis, et ces accumulations considérables de matières sont si pesantes qu'elles provoquent à la longue des effondrements. Tel est schématiquement un des fonctionnements de la tectonique des plaques, hypothèse récente qui rend compte de la dérive des continents et de l'évolution des formes du relief.



Formation de plissements sur la surface terrestre : les grandes chaînes de montagnes en Europe centrale et en Afrique du nord.



Coupe transversale des Alpes au Simplon. Longueur de la coupe : environ 25 km. Epaisseur : environ 9 km. (d'après Schmidt).

Reliefs alpins. Ces diagrammes montrent que le pliage qui affecte en permanence l'évolution des chaînes toutes "jeunes" doit être considéré globalement, tant en plan qu'en coupe. A de telles ampleurs, les plis verticaux se couchent sous leur poids et se chevauchent.



Jura. Les formes les plus élémentaires de pli sont situées en zone périphérique de moindre conflit. Elles empruntent les orientations simples et homogènes de l'«accordéon». Tel est le relief orienté du Jura, globalement constitué de crêtes et de vallées parallèles.

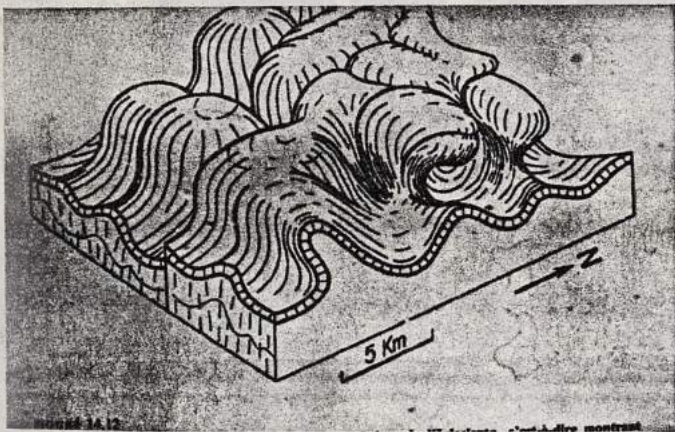
Pliements loupesux. Les zones d'actions techniques faibles agissent sur les stratifications sédimentaires régulières engendrant des plis de compression qui se déforment en loupesux (loupesux) et glissement entre les strates. Résultent les plissements les plus élémentaires qui ont été remarqués lors des parallèles d'alignement constants - et donc de l'orientation différent. Noter combien de fois accentués influent localement sur l'orientation, dans une région donnée et la vie.

Sardaigne. La conjugaison de plusieurs actions (simultanées ou consécutives) engendre des mouvements composites, comme en ce massif calcaire soumis à l'action de deux champs de contraintes perpendiculaires. Les deux directions d'ondulations simples, observables en coupe, donnent lieu à une résultante spatiale complexe.

Pli équilibré. Dans l'effort de la pression et de la durée, certaines roches, sans être fluides, subissent un fluage important. Celui-ci se traduit d'autant mieux que la roche est plus ou moins de l'ordre de roche élastique dans un territoire donné, comme en cette zone d'Armorique.

Décrochements. Lorsque les actions sont très différentes d'un emplacement à un autre, le plissement se constitue avec des intensités diverses, qui s'accompagnent de glissements et de décrochements.

Virgation. Le plis est parallèle à un déplacement de surface, sans son action est d'autant plus sensible sur les roches fluides et qu'il est plus intense, consistant de la superposition de deux plis roches les plus simples, les plus sont capables d'un millimètre.



ont de fortes chances d'être des décrochements (fig. 10.33).

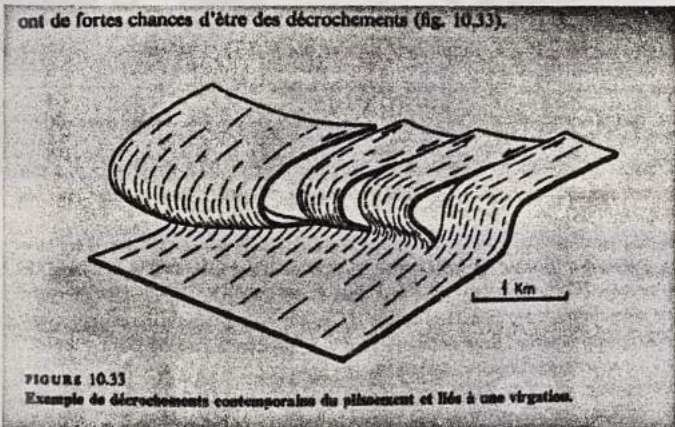
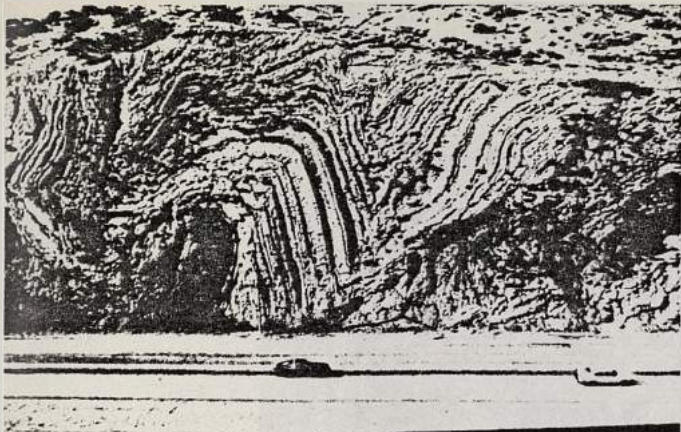


FIGURE 10.33
Exemple de décrochements contemporains du plissement et liés à une virgation.



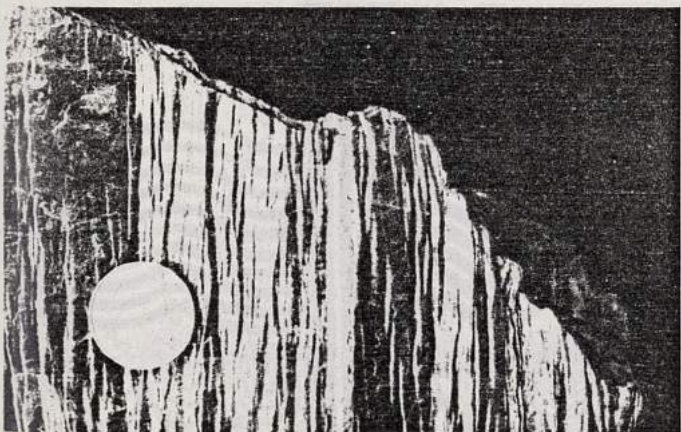
Faïlle Sant Andreas. Les zones de limite entre des plaques sont les lieux de conflit intense, comme l'illustre cette coupe faite par l'autoroute, perpendiculairement à la faille de Sant Andréas en Californie, lieu où deux plaques coulissent en sens inverse.



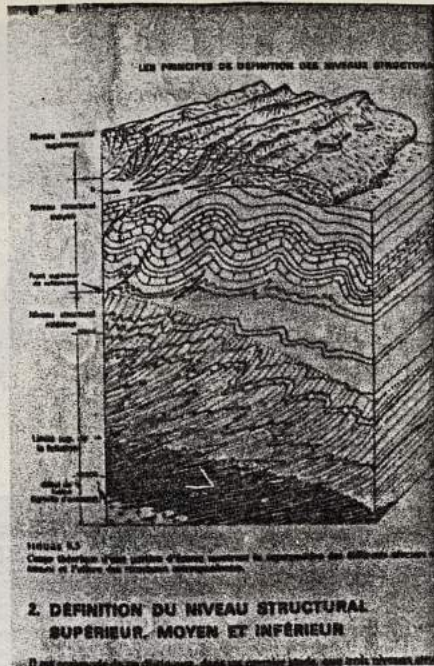
Plissements isopaques. Les zones d'actions tectoniques faibles agissant sur des stratifications sédimentaires régulières engendrent des plis de compression qui se résolvent en flexion (flambage) et glissements entre les strates. Naissent les plissements les plus élémentaires qu'on dit isopaques (couches parallèles d'épaisseur constante - et donc de forme différente). Noter combien de tels accidents influent localement sur l'hydrologie, donc sur la végétation et la vie.



Plis d'écoulement. Sous l'action de la pression et de la durée, certaines roches, sans être fluides, subissent un fluage important. Celui-ci se réalise d'autant mieux que la roche est proche du point de fusion (la roche s'écoule alors en turbulences fluides, comme en cette roche métamorphique).

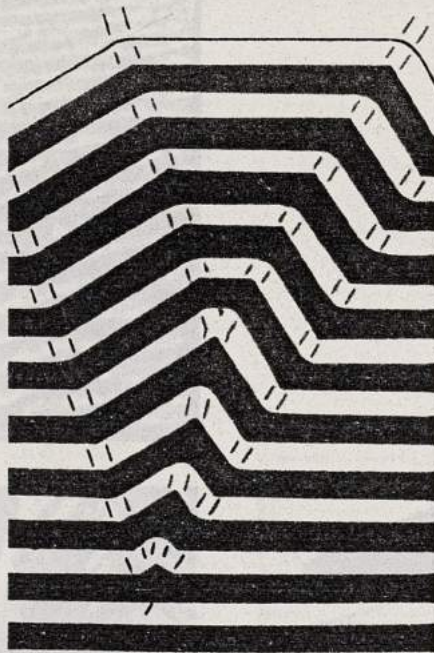


Micro-plis. Le pliage est prioritairement un phénomène de surface, aussi son action est d'autant plus sensible sur les roches feuilletées : en ce schiste lustré, constitué de la superposition de très fines couches fort glissantes, les plis sont espacés d'un millimètre.



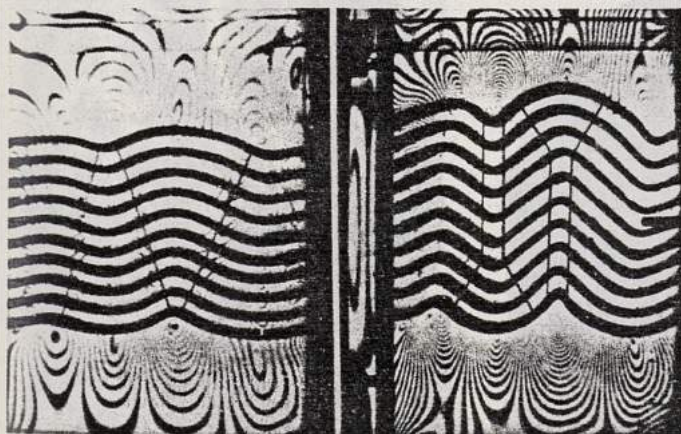
Bloc diagramme des niveaux structuraux. Pour une même action générale, les efforts varient en profondeur selon la pression et la température, ce qui affecte le comportement des matériaux. De cassants, ils deviennent successivement ductiles puis fluides, faisant succéder brisures et cisaillements, flexion, aplatissement, écoulement.

Comme il est de règle, la matière se dirige préférentiellement vers la direction de plus grande liberté, l'extérieur, où les reliefs sont de plus en plus accidentés.



Représentation géométrique. En même temps que les lois de la matière et de la mécanique, règnent aussi les exigences de la géométrie.

Des plis parallèles ne sont pas identiques : les plis, lieux caractéristiques de la variation, s'alignent selon la bissectrice des orientations de faces. Ces bissectrices se recoupent selon un réseau continu qui, dans l'espace, devient un système complexe de plans bissecteurs.



Modèle mécanique. Des intensités de pression différentes produisent des réactions variables de la matière.

Ces essais successifs sur un modèle en strates de gomme et de gélatine font apparaître respectivement :

- . des plis isopaques (parallèles, d'épaisseur constante),
- . des plis anisopaques (ou semblables, d'épaisseur variable).

Ces plis en "knick" (ou chevron) apparaissent dans les milieux fortement anisotropes.



Reliefs topographiques. Même lorsqu'ils ne consistent pas en une matière effectivement pliée, on peut trouver quelques parentés entre les reliefs montagneux et les systèmes plissés.

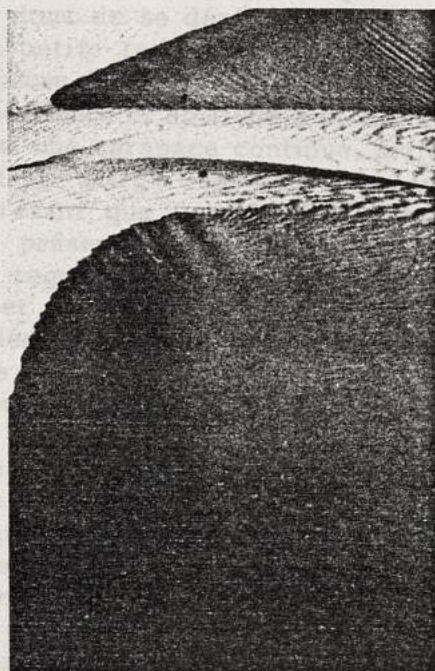
Comme cela se pratique dans certaines pédagogies actives, le simple froissement d'une feuille de papier, par la diversité de ses accidents superficiels, s'avère un excellent support pour mettre en scène toutes les caractéristiques d'un relief topographique : s'y dessinent lignes de crête et vallées, lignes de pente, géodésiques, cirques, cols et sommets. Leurs relations topologiques complexes y sont tangiblement écrites.

Ne dit-on pas en terme d'origami japonais "pli montagne", et "pli vallée" pour distinguer le saillant du rentrant ? Notions au demeurant très relatives (tout s'inverse lorsqu'on retourne la feuille, le saillant devient rentrant, un pic devient un cirque etc... et de même perceptivement lorsque l'on fait pivoter l'image d'un relief montagneux la tête en bas, la lecture aussi change).

Il est encore des cas où le pliage curviligne peut modéliser une surface d'égale pente.

En regard d'une feuille froissée très montueuse sont présentés quelques reliefs qui illustrent les correspondances évoquées ci-dessus.

- . "plis" en catastrophes laminaires sculptés par les flots,
 - . paroi montagneuse himalayenne,
 - . surface d'égale pente des dunes sahariennes,
 - . relief montagneux enneigé.
- (Avant que n'intervienne l'accoutumance à la forme, retourner les images et comparer les nouvelles interprétations).





ARTHROPODES

Galilée avait déjà observé que les objets de petite taille peuvent être fins et élancés, alors que les volumes importants sont nécessairement de proportion lourde et trapue, en raison de la limite de résistance de leurs matériaux constitutifs : quand change la taille, changent aussi nécessairement les proportions pour des raisons purement structurelles. D'Arcy Thomson explique ce principe fondamental de morphologie plus précisément : une augmentation de la longueur d'un objet tridimensionnel entraîne un accroissement de sa surface au carré, tandis que son volume augmente proportionnellement au cube de cette longueur : le volume, donc le poids, augmente plus rapidement que la taille. Pour une résistance de matériau donnée, des organismes de grosse taille seraient donc écrasés par leur propre poids, à moins d'être renforcés par une ossature interne. De ce fait, les organismes de petite taille peuvent s'accommoder d'un squelette externe, ou bien ne pas en avoir du tout.

En vertu du même principe, le rapport enveloppe contenante/volume englobé est plus défavorable chez les organismes petits que chez les grands, entraînant une déperdition d'énergie relativement plus importante - d'où la nécessité pour les petits de se nourrir plus fréquemment, et donc de se déplacer davantage. La faible inertie que confère la petite taille permet cependant cette mobilité moyennant une dépense d'énergie minimale.

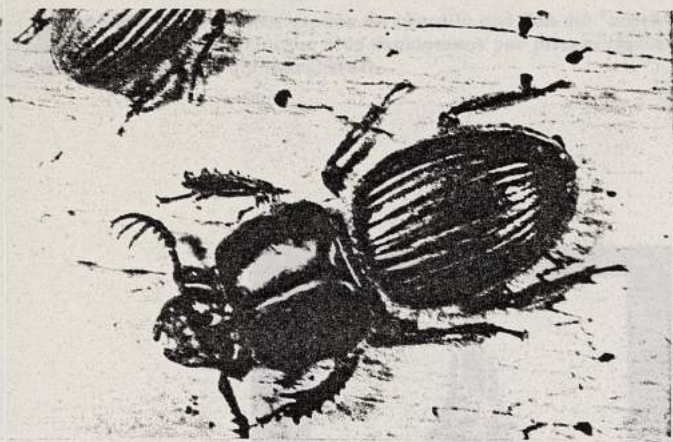
Petite taille, squelette externe, nécessité et aptitude à la mobilité vont donc de pair, ce qui implique une carapace continue, articulée, qui se réalise naturellement par pliage dans une alternance de "dur" et de "mou" (le dur n'étant que l'encroûtement local de l'épiderme exposé) : tel se présente l'embranchement des arthropodes (ou "articulés") qui regroupe principalement insectes, crustacés et arachnides - et qui représente la population la plus nombreuse et la plus variée du règne animal, aux performances des plus stupéfiantes. Ne peuvent donc être ici analysés que quelques rôles typiques que joue le pli.

Chez les insectes, par exemple : lors des métamorphoses de la croissance, par le passage de l'état d'œuf en larve, nymphe puis insecte parfait, le pliage intervient dans la différenciation des tissus et la genèse d'organes. Ces transitions s'effectuent nécessairement de manière continue, aussi l'état définitif conserve-t-il la trace des stades antérieurs, lorsque le pli était, dans la mollesse de la larve, l'organisateur du mouvement.

Dans le règne animal, l'insecte est le roi de l'ultra léger, aérien, volant, qui nécessite des ailes membraneuses extrêmement minces, rigidifiées par des plis. Ces appendices fragiles, encombrants peuvent se replier selon un rangement protecteur, sous de robustes boucliers nervurés dont la structure s'apparente aux constructions automobiles.

La modestie de leur taille autorise des appendices de forme élancée, assortie de reliefs relativement importants qui se constituent encore par replis du cuticule.

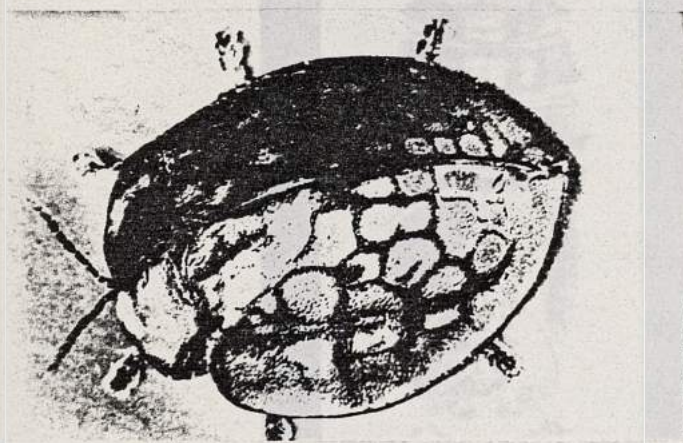
Le pli conjointement dessine et affirme la forme de ces "monstres" ou l'apparence semble revêtir une importance capitale pour la survie.



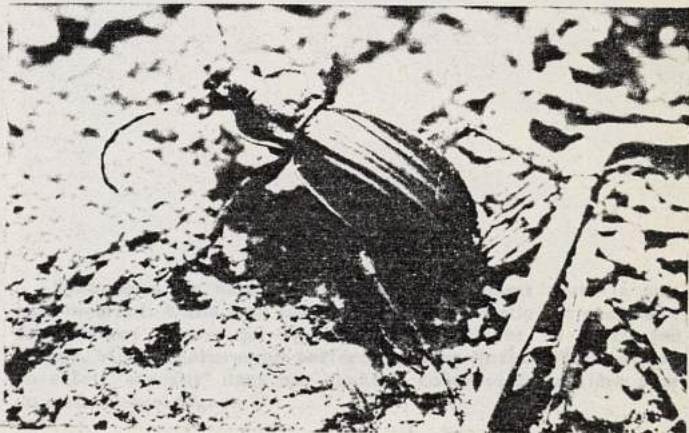
Coléoptères. Chez les coléoptères, la tête et le corselet sont de robustes coques chitineuses carénées. Les élytres recouvrent et protègent la partie la plus étendue et la plus molle du corps, l'abdomen. Ils abritent généralement de fragiles ailes membraneuses, précautionneusement repliées pour affronter les embûches de leur vie terrestre chahutée. Ces élytres nécessitent donc une structuration spécifique ; pour les petites tailles, la forte courbure est un atout suffisant qui ne nécessite guère d'autre artifice. Chez les coléoptères de grande taille, la courbure est plus faible ; aussi, constate-t-on souvent des reliefs plissés qui, à la manière d'un capot de voiture, rigidifient ces coques selon leur direction de moindre courbure.

On observe une grande variété de profils (forme, fréquence et amplitude des plis) qui correspondent aux proportions, consistances et modes de vie de ces insectes :

- Bourrelets des Scarités et Bousiers
- Curieux bosselage de Cassidé
- Rairures des élytres mous de Nécropophage.

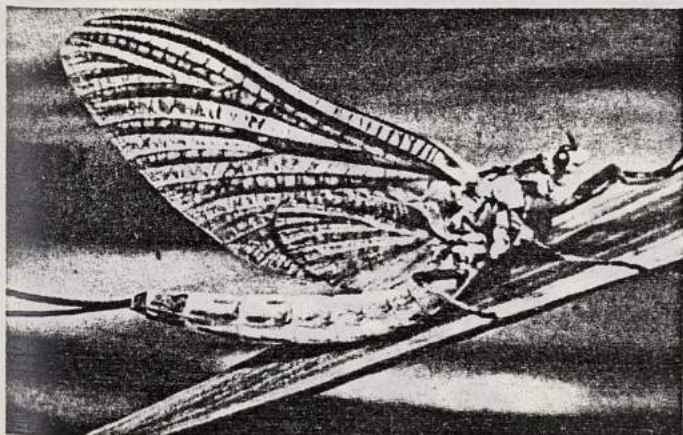
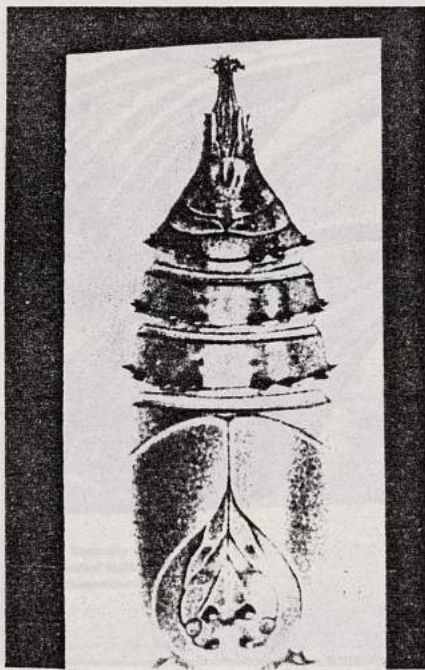


Les élytres du *Carabus Auronitens* sont particulièrement "parfaits" : ourlets rigidificateurs aux rebords, ondes amplement et régulièrement galbées, et dont les reflets (qui s'accroissent obligatoirement au voisinage des emplacements de plus forte courbure qui constituent chaque pli) accentuent la forme et l'éclat de la carapace vermeille.

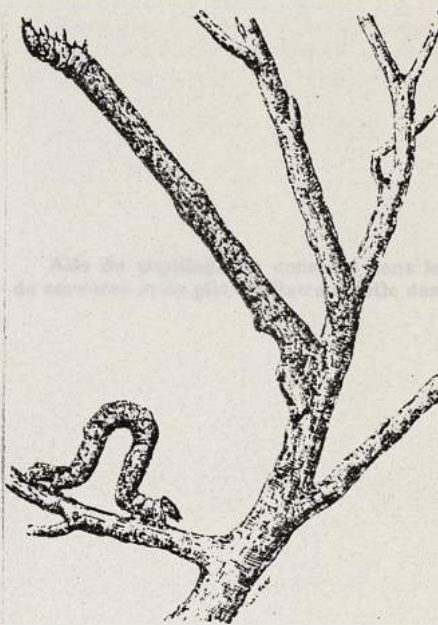




Géométride. Chez cette espèce de chenille que l'on dit "arpen-teuse" la locomotion s'effectue très rapidement par pliage/déplia-ge, comme un compas qui marcherait...



Curculia. Il n'est que replis pour accompagner les contorsions entre chaque segment de cette chenille, qui progresse comme un accordéon dont les contractions se propagent par trains d'on-des.



• Fig. 39. — Chenilles arpentueuses (de Papillons Géométrides).

Chrysalide. Le corps étroitement compacté de la nymphe porte les stigmates des états antérieurs (plis articulaires entre les métamères). Chaque appendice en gestation est étroitement replié, conditionnement qui prédispose les possibilités de déploie-ment ultérieur.

Ephémères. Ils naissent au crépuscule, volent toute la nuit puis meurent. L'aile leur est un outil capital : elle est enchassée de nervures ténues qui structurent visiblement un subtil jeu de-plis, afin d'améliorer les performances en flexion. (Et pourquoi, en effet, "investir" dans une quantité coûteuse de matière pour un instant aussi fugace ?)



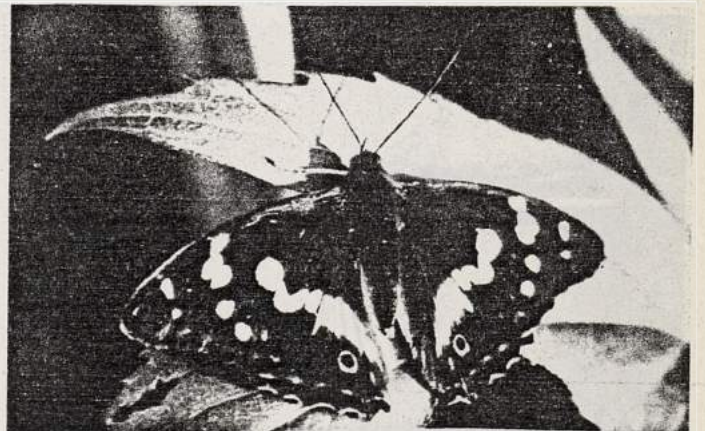
Eclosion de Colias. Lors de l'ultime métamorphose du papillon qui sort de sa chrysalide, les nervures se gonflent en se gorgeant de liquide; elles déploient la membrane des ailes qui se tendent. Une fois celle-ci rigidifiée, le papillon prend son vol.

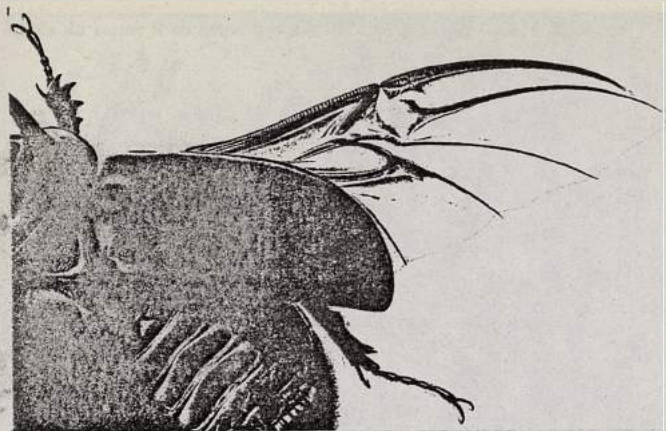


Aile de papillon. On constate dans les ailes une organisation de nervures et de plis similaire à celle des feuillages.

Limnitis. Par la permanence de ces effets, le pliage engendre des attitudes universelles :

- . Replis de refuge dissimulateur et protecteur (fermeture des ailes présentant discrètement leur plan sur la tranche)
- . Déploiement aventureux, voir agressif (exhibition soudaine de motifs violemment contrastés lorsque le papillon est inquiet).

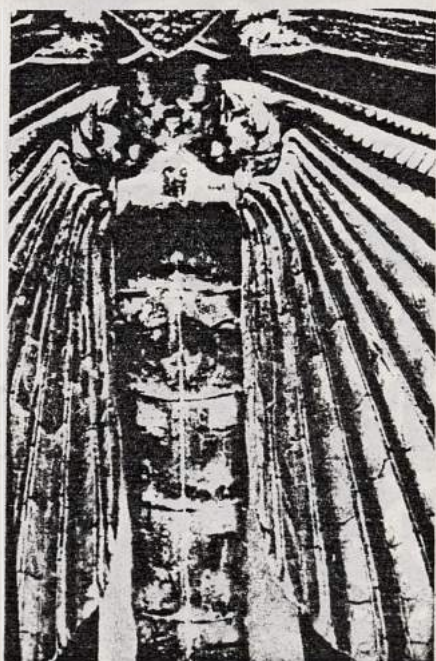




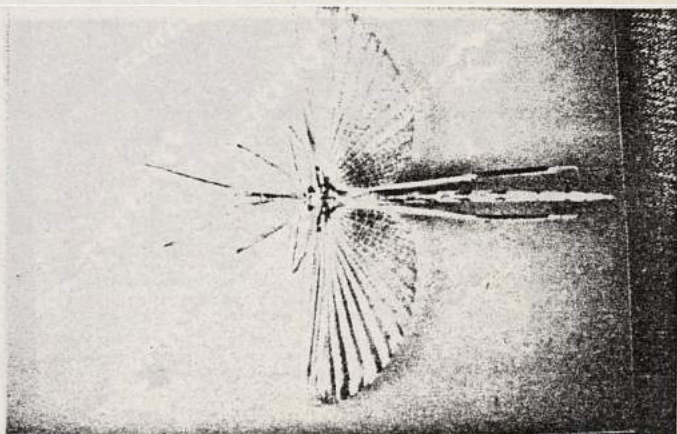
Scarabée. L'aile de ce grand coléoptère se range à la manière d'un éventail que l'on replie en deux dans le sens de la longueur; il en résulte quelque complication dans l'articulation des nervures qui structurent la membrane.



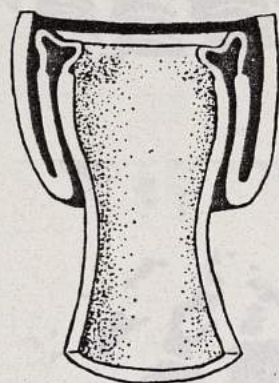
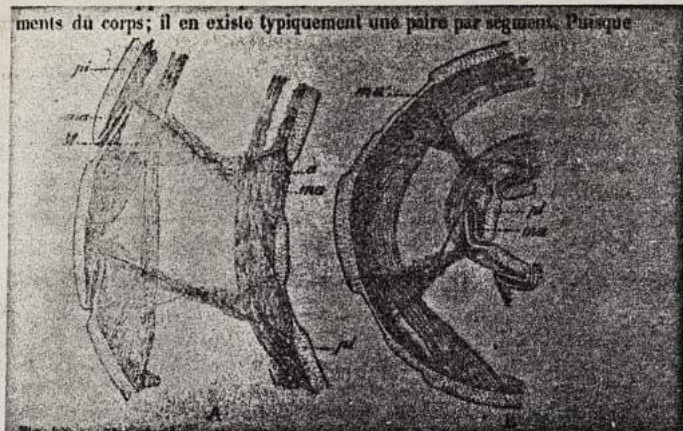
Forficule. Cet insecte n'a que de très petites élytres pour abriter les ailes nécessairement assez étendues afin de soulever un corps long et pesant. L'éventail se replie en zigzag accordéon.



Orthoptères. Ces insectes ont un corps allongé. Leurs voilures se replient au long du corps en un simple éventail. Des plis nervurés alternent avec des plis "nus" qui pendent spontanément.



ments du corps; il en existe typiquement une paire par segment. Puisque



Formes d'articulations chez les insectes
(extrait d'Eidmann, d'après Weber).



Queue de crustacé. Il n'est de mouvement qu'on ne sache engendrer par conjugaison de rotations élémentaires. Chacune de celles-ci se réalise autour d'un emplacement momentanément fixe, le centre de rotation. Celui-ci, parce que fixe, constitue un endroit qui davantage que les autres a quelques raisons de se "solidifier". Autour de ce pivot, tout n'est que jeu de plaques et replis en soufflet. Les centres de rotation sont situés sur la fibre neutre de flexion. Les parois dorsales et ventrales fonctionnent identiquement par superpositions "accordéonnesques" lors de leurs extensions ou contractions.

Articulation. Le squelette externe de l'insecte est nécessairement une cuirasse continue, y compris aux emplacements de transition qui s'agencent par replis.

Cette coupe schématique d'une articulation montre que celle-ci se construit par une succession étonnamment logique de replis.

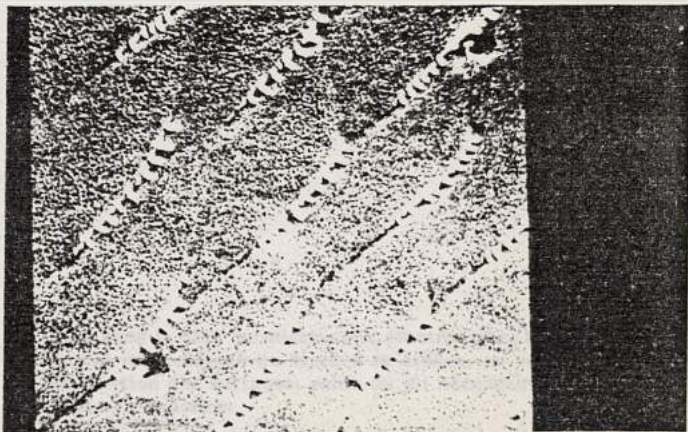
- . Un simple va-et-vient réalise une solide enceinte à double paroi pour loger la rotule.

- . Un amincissement de la paroi constitue un fragile joint souple (humide et protégé parce qu'interne). Quelques replis secondaires procurent l'étendue nécessaire au jeu articulaire.

- . Dans l'article suivant de la patte, une ondulation constitue la rotule puis creuse une gorge qui aménage le débattement nécessaire aux diverses orientations possibles.

Blatte. La mollesse de ces reliefs fortement plissés atteste que cette glande sternale se situe en zone articulaire.

Ces reliefs orientés en écailles, que l'on verrait en coupe comme des replis, constituent les aspérités antidérapantes de la face interne d'une patte.





Oeufs d'insectes

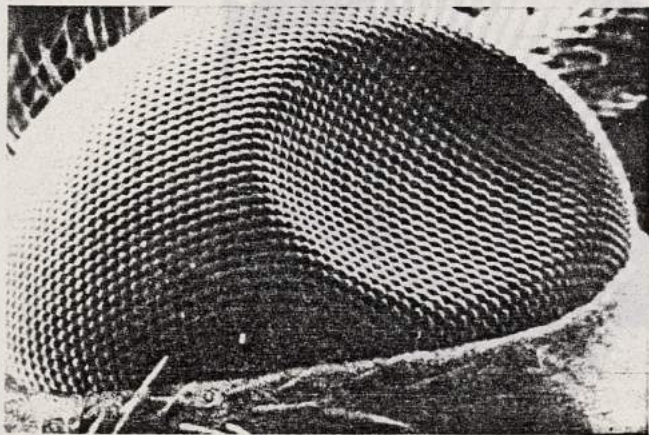
Les œufs de papillon doivent subsister plusieurs jours. Ils sont constitués d'une matière fort ténue, parce que comestible pour la larve qu'ils engendreront.

Leur très fine paroi est souvent constituée de reliefs structurants qui défendent la vie. En tant que masse issue d'un milieu humide et soumise à un dessèchement soudain, leur conformation semble procéder des mêmes principes qui, à des échelles similaires, occasionnent le relief des graines.



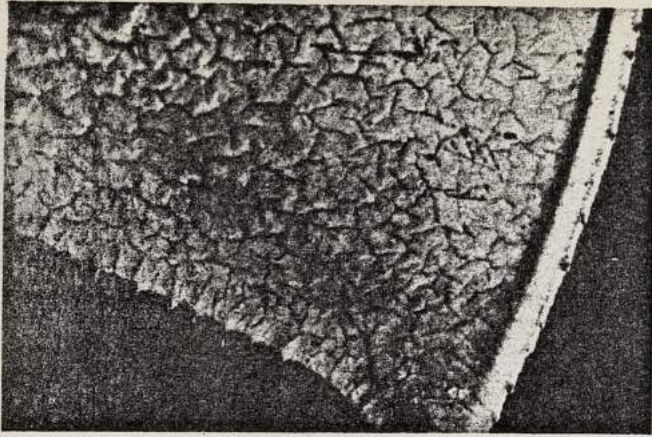
Oeuf de piéride. On distingue deux niveaux de structuration ; des côtes primaires selon les directions méridiennes de moindre courbure supportent des nervures secondaires selon la direction perpendiculaire de plus forte courbure.

Les sinuosités des premières montrent qu'elles sont directement la continuité des secondes par pliage de la membrane qui les constituent. (voir les règles de pliage de la fonce).

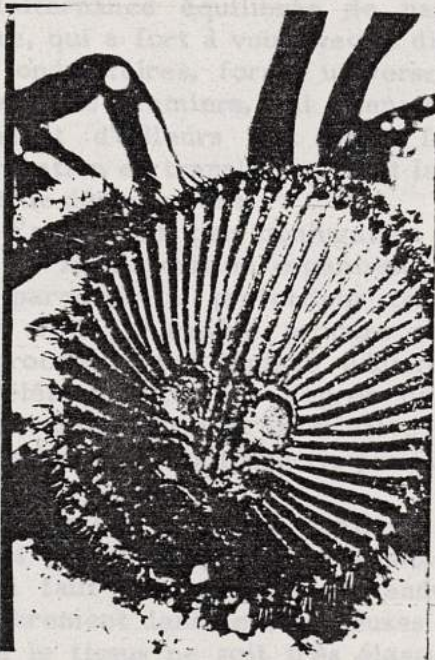
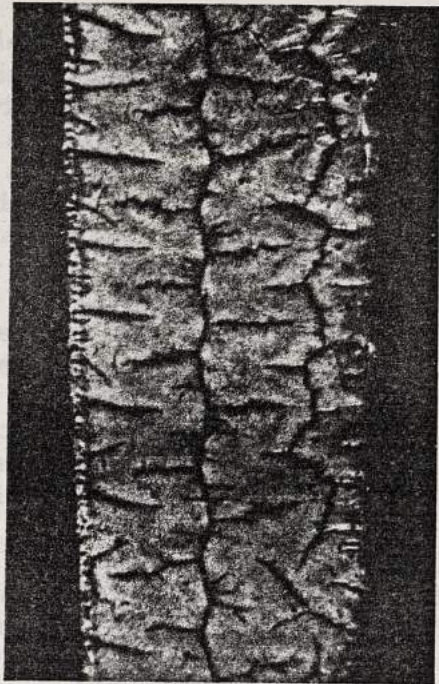


Oeuf de limenitis. L'origine de ces divisions quasi géodésiques est à rapprocher de celle de la graine de pavot, déjà expliquée.

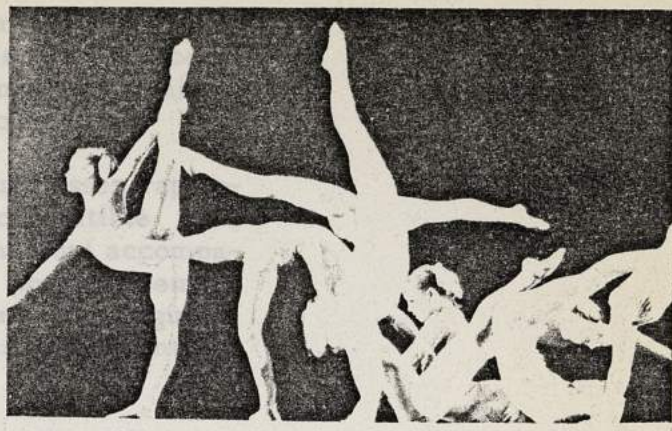
Taon. Sous le vide du microscope électronique, la paroi sphérique de cet œil composé de diptère se creuse, en vertu des règles de déformation des surfaces, selon un pli nécessairement curviligne, plan et circulaire.



Carapace de limule. Avant que le crabe ne mue, la nouvelle carapace se forme sous la vieille, plus grande, et donc plissée. Après la chute de l'ancienne carapace, la nouvelle se gonfle, durcit, mais garde des traces de l'état frippé antérieur (voir les reliefs caractéristiques du coude).



Araignée. Le postérieur de cette *Cyclocosma Truncata* est constitué d'un bouclier résistant, fortement nervuré, au moyen duquel elle obstrue l'orifice du tunnel où elle se dissimule. En plus du rôle structurant des nervures, on ne peut que s'étonner de leur dessin dissuasif parce qu'explosif et anthropomorphe.



MEMBRES ET PLIS

C'est l'inéluctable condition de tout objet matériel d'être constitué de forces qui interagissent en évoluant dans l'espace et dans le temps. La vie, qui semblerait résulter de ces interactions, implique cette évolution dans les deux acceptions du terme : accommodation aux conditions changeantes du milieu et mouvement qui engendre des déplacements, et les formes les plus évoluées du vivant aboutissent à des êtres indépendants qui se déplacent pour vaquer aux activités nourricières de la vie.

Cette nécessité de se mouvoir imprime sur les êtres vivants les conditions de la réalisation du mouvement, selon des dispositions impérativement conformes aux lois du milieu ambiant. On constate que le pliage est l'auxiliaire obligé de cette accommodation de la matière aux impulsions vitales, qui permet la réalisation du geste en chaque membre ainsi que l'articulation entre les grandes divisions du corps.

Ces organes de la motricité sont en général marqués du sceau de la symétrie (la symétrie est un principe fondamental de morphogénèse qui, par raison d'économie, régit l'équilibre, les répétitions périodiques et l'orientation qui exprime un tropisme...) Ainsi s'engendrent les archétypes premiers de pliage, l'enroulement et l'accordéon (alternance équilibrée de part et d'autre d'une continuité linéaire, qui a fort à voir avec la disposition sinusoïdale des phénomènes ondulatoires, forme universelle du mouvement). Ces deux agencements premiers, qui connaissent maintes variations, correspondent d'ailleurs aux deux formes élémentaires du mouvement, rotation et translation, dont la conjugaison recompose toute espèce de déplacement.

Ces appendices s'articulent par conjugaison d'axes de rotation, dont le nombre et la disposition organisent le degré de liberté nécessaire pour parcourir la profondeur tridimensionnelle qu'ils doivent explorer. (Une charnière procure un degré de liberté, et le système procède d'une logique additive). On constate la robustesse et l'éléментарité des degrés de liberté restreints, la complexité, la vulnérabilité et la relative faiblesse des degrés de liberté élevés qui sont en contrepartie plus agiles et adaptables.

Des membranes animées peuvent contribuer au déplacement. A la manière des plis d'une jupe inextensible qui n'entrave pas le mouvement, il faut une quantité d'étendue importante pour pouvoir évoluer librement dans de nombreuses directions de l'espace : à moins que le tissu ne soit très élastique, des fronces ou

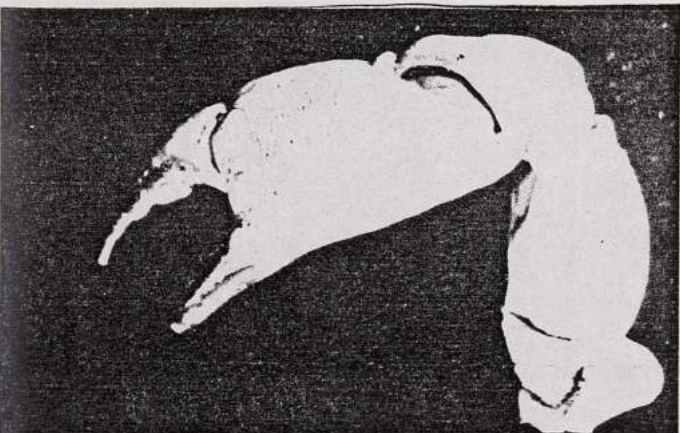
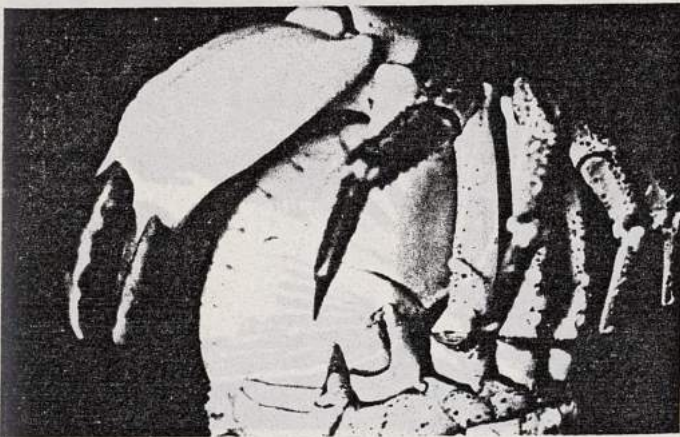
toute autre modalité de variation dans la répartition locale de la matière s'organisent en plis pour favoriser le libre parcours spatial d'un voile. Ce dernier parvient dès lors mieux à s'animer pour déplacer les masses fluides et engendrer le mouvement.

Ces accessoires du mouvement, qui doivent remuer assez rapidement, ont nécessairement une conformation compatible avec les évolutions beaucoup plus lentes de la croissance qui accompagne l'embryogénèse : leur formation s'effectue progressivement dans une enceinte compacte, et leurs replis refermés préfigurent les possibilités d'expansion et de contraction qui animeront les palpitations de la vie.

Toute masse tridimensionnelle est limitée par une frontière bidimensionnelle, lieu des échanges entre deux milieux et qui reflète nécessairement certains mécanismes profonds. Aussi les plissements superficiels racontent-ils ou dramatisent-ils la nature des variations internes.

Ces emplacements d'incessants changements (quelle fatigue !) sont à la longue gravés dans les chairs, tant au long de la phylogénèse que de l'ontogénèse, et où ils se constituent d'une consistance particulière.

D'un point de vue connexe, la communication qui nécessite l'action, le geste, trouve là ses accessoires d'origine ; et la grâce d'une danse se réalise dans ces souplesses.



Tourteau. Chaque mouvement dans l'espace peut se réaliser par conjugaison de rotations. Tout objet en déplacement possède un emplacement fixe (centre ou axe instantané de rotation). Lorsque cet endroit fixe est situé à l'intérieur de l'objet animé, il peut constituer un support solide pour articuler le mouvement : C'est ainsi qu'il se matérialise dans la flexion d'un membre, sur le plan neutre de celui-ci, où les déplacements de matière sont inexistantes. Cette rotation est limitée par la matérialité même de l'objet (la nature n'a pas inventé la roue qui eut exigé quelque indépendance de cet accessoire avec son support nourricier). La faculté d'un membre à évoluer dans la tridimensionnalité tient au non-parallélisme des axes qui l'articulent. Son degré de liberté, c'est-à-dire sa plus ou moins grande aptitude à la mobilité est fonction du nombre de ces axes : aussi constate-t-on en tout membre que, afin d'évoluer le plus aisément possible dans l'espace tridimensionnel, le degré de liberté (c'est-à-dire le nombre d'axes) est régulièrement supérieur à 3, ce qui autorise plusieurs attitudes distinctes pour accéder au même emplacement - ce qui est un gage de sécurité.

Sur tout membre enfin - et singulièrement sur ces pattes de crabe qui sont périodiquement molles à l'époque de la mue - on peut observer que, telle la rigidification d'une surface souple pliée, le détail de l'articulation s'organise conformément aux règles du pliage curviligne.

Tout en considérant que le pli est une charnière, observer donc ici :

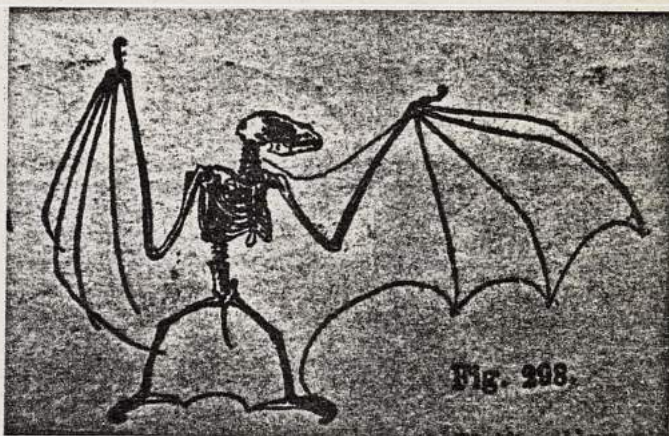
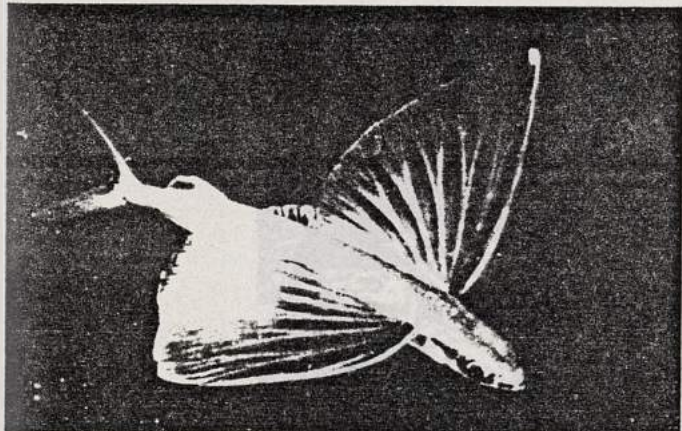
- . Le nombre et la position spatiale des axes de rotation (ceux-ci se coupent parfois et forment alors l'équivalent d'une rotule).
- . Le degré de liberté élevé au départ même du membre (c'est-à-dire la concentration de 3 axes de rotation au voisinage de l'attache de la patte).
- . Le détail des axes articulaires, constitués de deux pivots les plus éloignés possibles pour définir une charnière robuste.
- . Le pliage curviligne au voisinage même de l'articulation.



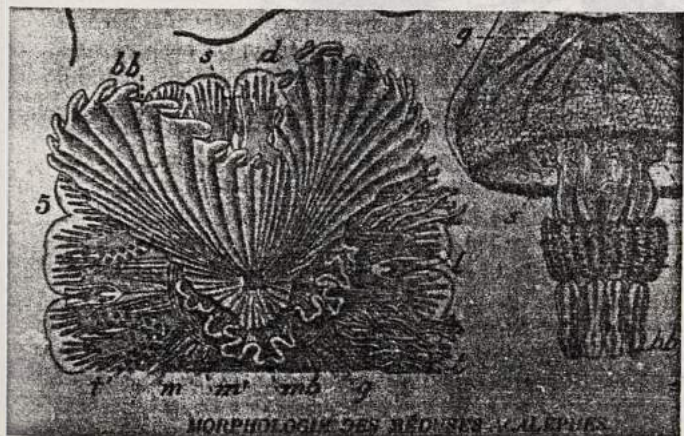
Etrille. Cet appendice caudal d'étrille est une paroi mobile qui abrite les œufs. Les articles de cette cloison sont constitués de fines cornières plissées (robustes) articulées chacune tout au long de ses bords.



Fou de Bassan. Les membres des vertébrés sont globalement constitués selon le schéma élémentaire de l'accordéon. C'est une modalité très pratique d'articulation qui autorise une grande variété de dispositions spatiales, susceptible de s'étendre à distance, comme un pantographe. Il présente des variations importantes de proportion, qui témoignent de l'adaptation de chaque espèce aux conditions du milieu. Cet accordéon est particulièrement adapté chez les êtres volants : leur locomotion exige une surface porteuse importante qui doit pouvoir se ranger au repos.



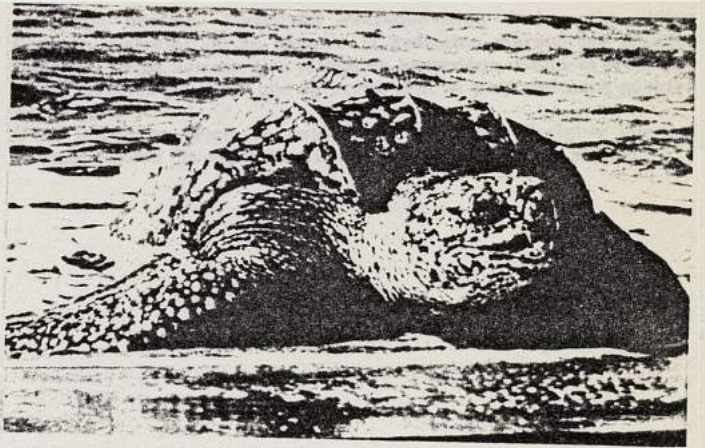
Chauve-souris et poisson volant. Le principe de la palme est propice à la propulsion aquatique, voire même aérienne. Il se réalise par pliage "éventail", variété centrée de l'alternance en accordéon : à partir d'un emplacement restreint peut se développer, s'animer ou se ranger une étendue importante, étayée par une ossature.



Méduse acalèphe. Un des quatre longs bras buccaux, constitués d'une membrane fortement plissée. Il entoure l'orifice buccal et ses nombreuses ondulations lui permettent de brasser beaucoup d'eau.



Eléphant. La peau des éléphants est dure. La présence de plis assure une relative souplesse, particulièrement nécessaire aux emplacements fortement sollicités.



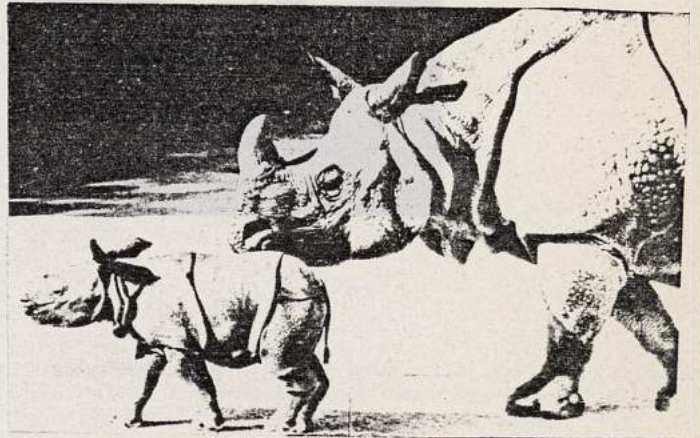
Luth. Cette tortue marine est l'espèce la plus grande du monde. (1,70 m de long). Sa carapace n'est pas comme les autres constituée de plaques mais d'un grand bouclier renforcé par 7 plis longitudinaux. Ces directions correspondent à la fois aux directions prioritaires de renforcement ainsi qu'à une orientation des reliefs favorables au déplacement.

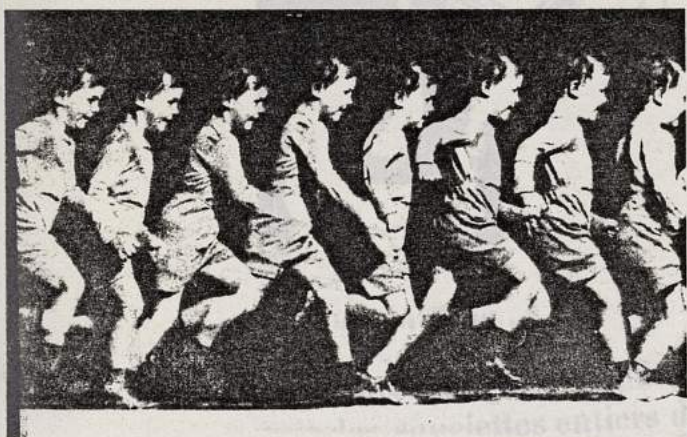


Tortue. Une grande souplesse (c'est-à-dire une aptitude à plier) est nécessaire à la peau de la tortue :

- . comme joint de transition entre le bloc immobile de la carapace et les appendices mobiles,
- . comme soufflet extrêmement mobile lorsqu'elle rentre la tête.

Rhinocéros. La carapace très coriace du rhinocéros est constituée de plaques que séparent des joints d'accommodation plissés. Ils correspondent dans les grandes lignes aux principales divisions du corps qui s'articulent dans la marche ainsi que dans les divers types de mouvements usuels.





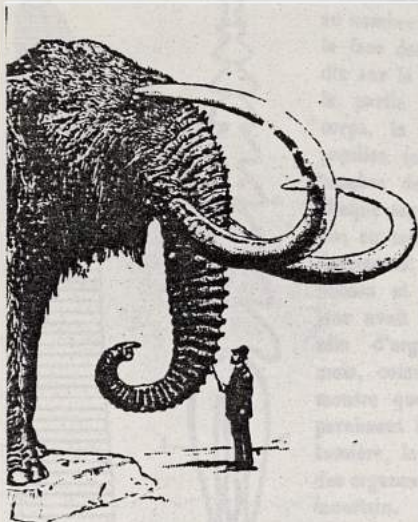
Corps humain. L'attitude recroquevillée à laquelle oblige l'espace restreint où se déroule la gestation marque les grandes lignes du corps humain d'un pliage en accordéon. Celui-ci prédispose au diverses postures que le corps peut le plus aisément adopter par la suite. C'est d'ailleurs selon ce retour aux attitudes d'origine que les défunts étaient "rangés" dans les sépultures de l'âge de pierre.

Repliability héréditaire. Parmi les dizaines de milliers de gènes qui font partie du patrimoine héréditaire caractérisant l'individu, seul deux mille d'entre eux concourent à produire le vaste éventail des différences morphologiques de l'espèce humaine. Moyennant la présence d'un certain gène dominant, cet enfant peut replier la langue d'avant en arrière, ce à quoi ne parvient que moins d'une personne sur mille.

Par de soigneux croisements, il est possible de "sculpter" l'évolution et de conjuguer telle ou telle caractéristique héréditaire chez des individus de même espèce. Ainsi, cette variété de chats, le "scottish-fold". (Le pli est aussi dû à la présence d'un gène dominant).



Pélican. Sous la mandibule inférieure de son bec, le pélican possède une vaste poche membraneuse où il emmagasine la nourriture de ses petits. Celle-ci est fortement marquée de plis, tant pour ses variations de contenance qu'à cause des contraintes de cisaillement qu'elle subit lors des changements d'attitude.

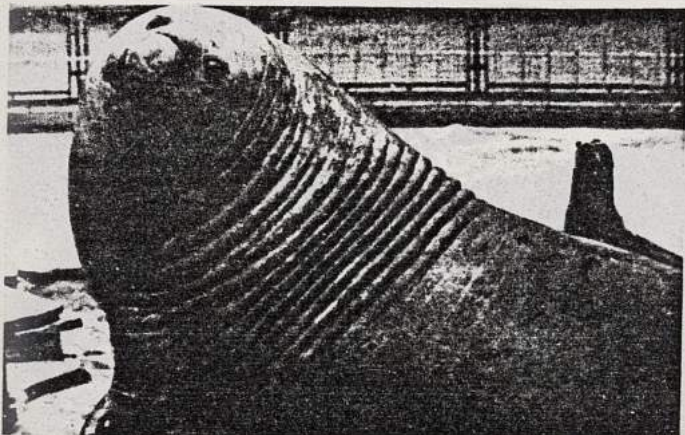


Mammoth (long., 5 m.).

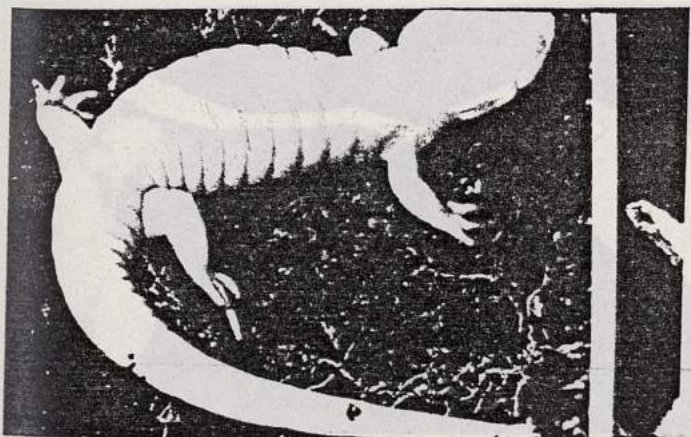
Il a été nos ancêtres; mais on trouve des squelettes entiers d'



Mamouth. La faculté de s'orienter très librement en toutes les directions marquait les trompes de mamouth d'une succession de reliefs plissés annulaires.

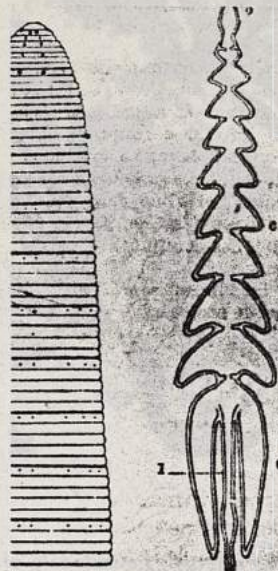


Eléphant de mer. Toute flexion se réalise par un jeu d'extensions et de contractions de part et d'autre d'une surface neutre, lieu des axes de rotation (là est située la colonne vertébrale). Des bourrelets, qui ne dépassent pas cette surface bissectrice, marquent les emplacements de compression à l'occasion de ce geste.



Salamandre. Des bourrelets, dont on peut comprendre l'origine dans les plis qu'occasionnent les ondulations latérales de quasi reptation, marquent tout le corps de cette salamandre.

Lombric. La progression du lombric s'effectue par une succession d'élongations et de contractions longitudinales qui se résout localement par pliage/dépliage. Aussi, toute son anatomie externe et interne est-elle empreinte de cette mécanique, comme on l'observe sur cette coupe où tant l'épiderme que l'organe circulatoire interne constituent des accordéons continus.

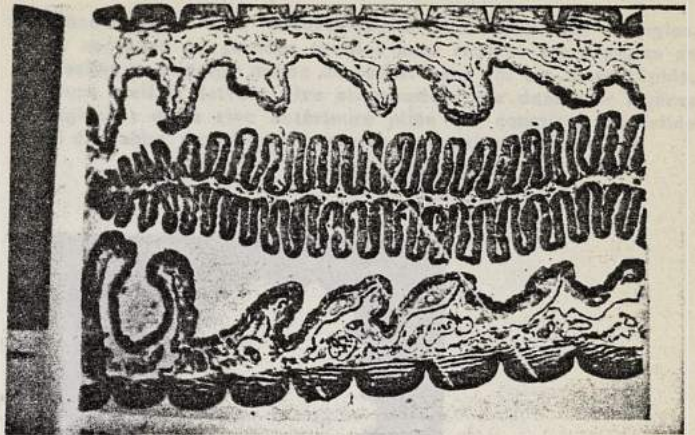


isation extérieure
— A, un zoostite;
ix qui le compo-
se sensitifs anté-
rieurs du pro-
chaine segment.

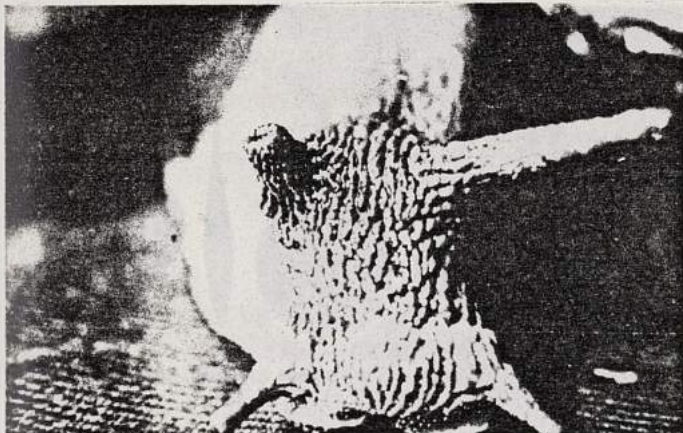
Fig. 205. — Tube di-
gestif de la Sang-
sue : — a, oeso-
phage; c, C, es-
ophage; I, rectum;
c, sang.

riels(s) en form
au nombre de
la face dorsal
dix sur la fac
la partie an
corps, le nor
papilles (com
nombre des
chaque segme
fle; en même
deviennent pl
neuses et let
leur avait fait
rôle d'organe
mais, comme
montre que l
paraissent ins
lumière, le rô
des organes se
incertain.

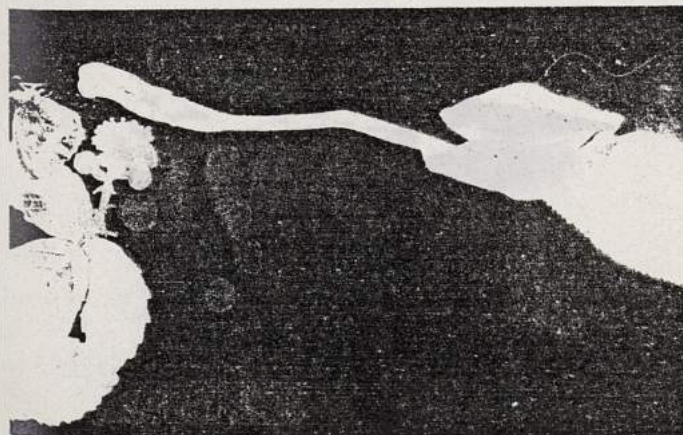
La cavité
plus ou moins
un parenchym
tif, qui ne la
qu'un certain



Sangsue. Des raisons analogues expliquent la forme de l'appareil digestif de la sangsue (peut-être même faut-il comprendre là une raison de la métamérisation, c'est-à-dire la division du corps de certains animaux en une succession de segments identiques).



Escargot. La corne d'escargot offre un exemple type de déplacement fonctionnel du pli sur sa surface support. Celle-ci, telle une chaussette que l'on retourne, rentre ou sort par pliage curviligne mobile.



Caméléon. Le caméléon, rigoureusement immobile, projette soudain l'extrémité gluante de sa langue sur sa proie à une distance équivalente à la longueur de son propre corps. On voit ici le zigzag de dépliage.



Poisson. Le squelette globalement plan des poissons se ramifie en Y renversé au niveau de l'abdomen pour contenir les viscères et protéger leur inconsistance. Chez ce gros poisson, la lame mince et fragile de chacune des arêtes ventrales doit résister tant à la flexion qu'à la compression axiale : comme une cornière, elle est renforcée par un pli.

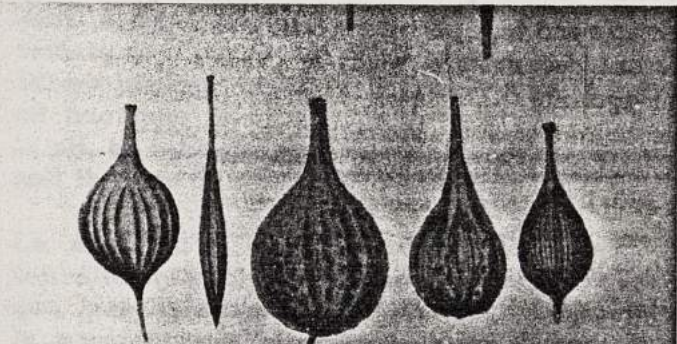
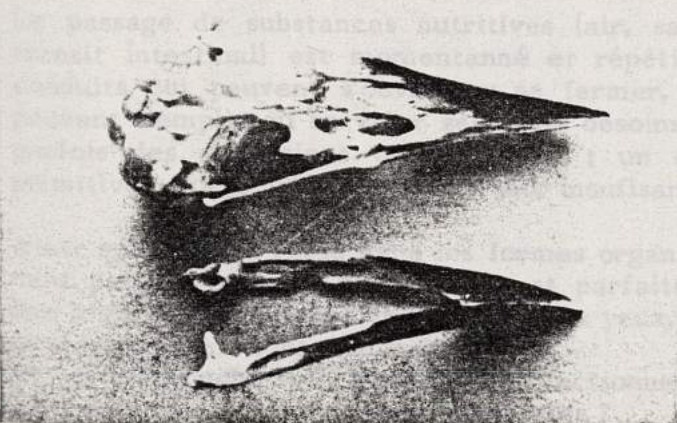
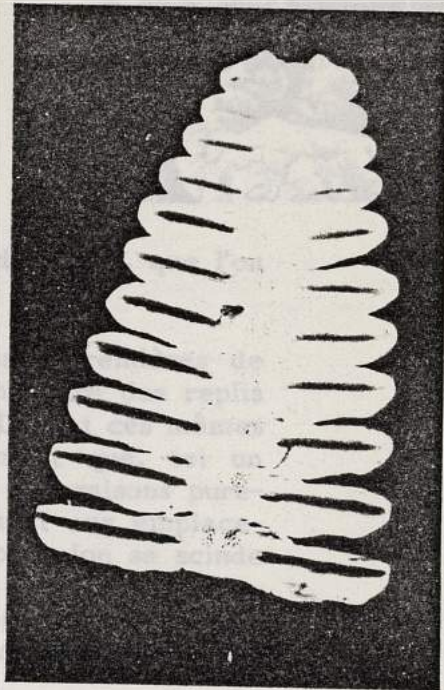


Fig. 130. Various species of *Lagena*. After Brady.

axial chemical tendency of the large semifluid cylinder



Chauve-souris. Les chauves-souris sont quasiment aveugles. Aussi ont-elles de grandes oreilles pour repérer leurs proies au son, selon le principe même du radar. Leur vol est assez rapide, et leurs oreilles doivent être structurées pour demeurer légères et rigides : d'une rive antérieure pliée qui constitue un solide "bord d'attaque" partent des nervures secondaires rigidifiantes.



Foraminifère. Les foraminifères sont des protozoaires aquatiques de toute petite taille. En ce milieu liquide, où la pesanteur intervient de façon mineure, le corps se sculpte par équilibre de tensions superficielles : Le mince squelette calcaire en forme de goutte de *Lagena* est renforcé selon la direction la plus vulnérable, celle de plus faible courbure (selon d'Arcy Thomson, ce seraient des variations de pression interne qui occasionneraient ces plis, la direction de plus intense courbure étant régulièrement la plus agissante).

Bec de corneille. Le bec des oiseaux réunit quelques propriétés essentielles du pli, constituant un outil efficace d'une grande simplicité :

- . Orientation du dièdre qui permet la contenance.
- . Forme de résistance à la flexion, où les rebords latéraux non pliés sont comme il convient à leur nature, sollicités en extension.
- . Le pli procure aussi une résistance axiale en compression et peut donc tout naturellement être acéré à l'emplacement même du pli.
- . Les rebords latéraux, généralement sollicités en flexion/extension, peuvent être structurellement minces, donc coupants.

ANATOMIE INTERNE

L'anatomie interne des êtres vivants foisonne de replis, que l'on peut constater pour trois raisons principales :

Lors de la différenciation cellulaire des phases premières de l'embryogénèse, la prolifération des cellules engendre des replis qui deviennent le siège des différents organes. Durant ces mêmes phases de croissance, il survient inéluctablement que, tel un bourgeonnement, une continuité bifurque. Pour des raisons purement géométriques, des singularités se constituent aux emplacements de ramification. Lorsque le corps d'un pantalon se scinde en deux jambes, l'entre-jambes apparaît comme un lieu qui appartient tant au corps qu'aux jambes ; un tel endroit, dont on réalise le caractère très particulier, est dans sa forme compactée qui précède l'expansion, un pli.

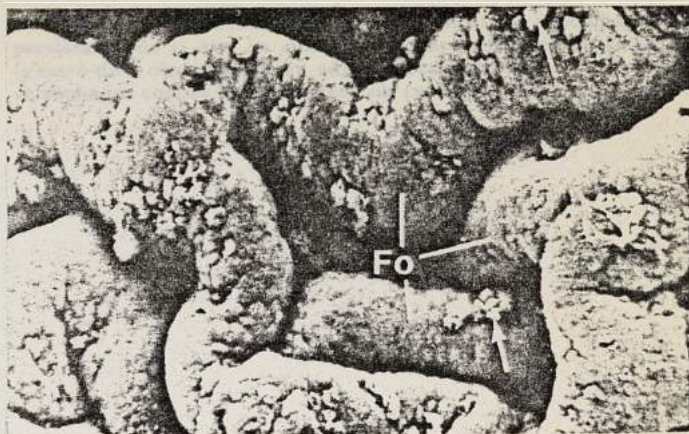
Il est encore utile d'observer que ces caractéristiques correspondent à des phénomènes de maximum et de minimum dans les variations d'un potentiel d'énergie, les données d'extremum étant déterminantes quant aux processus formateur dans un monde où triomphe la loi de moindre effort. Il est dès lors normal que le pli, en tant que lieu paroxysmique qui réunit, contient et protège, soit le siège de comportements tout particuliers.

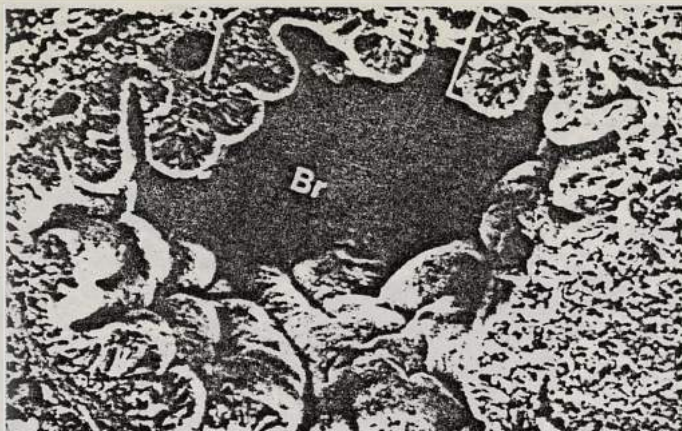
La survie d'un certain volume de substance vivante dépend de son alimentation en énergie, laquelle ne peut lui être prodiguée que par l'intermédiaire de la membrane bidimensionnelle qui le contient : Afin d'augmenter la surface d'échange entre deux milieux de volume donné, on voit les parois des organes se gauffer, tels les replis d'un radiateur à ailettes, ce qui améliore le rendement nourricier.

Le passage de substances nutritives (air, sang, bol alimentaire, transit intestinal) est momentanément et répétitif. Il nécessite des conduits qui peuvent s'ouvrir ou se fermer, des réceptacles qui peuvent s'emplier ou se vider selon les besoins. Le débit nécessite parfois des dilatations considérables ; un dépliage des parois, primitivement repliées, supplée à leur insuffisante élasticité.

Ainsi qu'il est de règle dans les formes organiques qui nous fascinent par l'intégration énigmatique et parfaite des fonctions dans une logique globalement cohérente à nos yeux, le pli assure souvent là plusieurs fonctions simultanées.

Et ne s'approche-t-on pas là de fonctionnements fort intimes, aux résonances littéralement viscérales ?

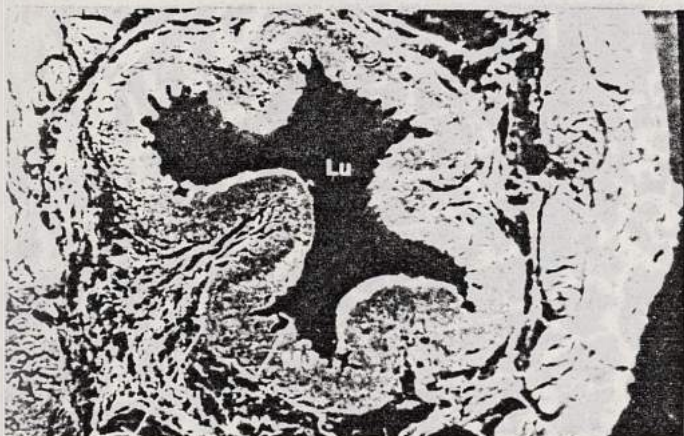




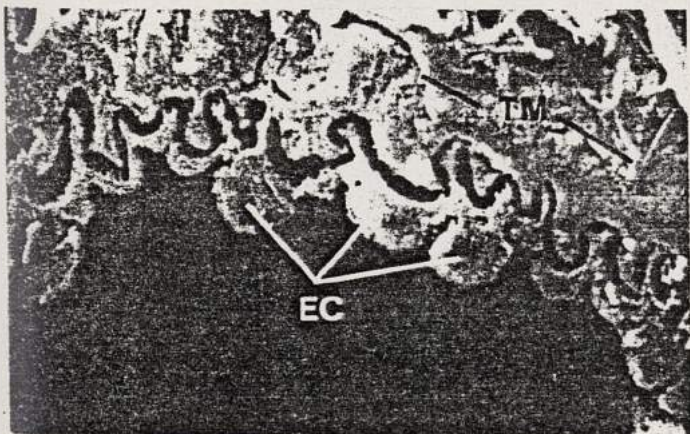
Bronche. La permanence de la respiration accompagne la persistance de la vie. La succession d'inspirations et d'expirations (c'est-à-dire d'expansions et de contractions) produit des pliages et dépliages comme on le constate sur cette coupe des bronches.



Vessie. Des nécessités analogues de dilatation et de rétraction momentanées impliquent la présence de plis en chacun de nos "récipients" et "tuyauteries", telles ces parois de la vessie.



Oesophage. Deux niveaux de plissement - macro-plis et micro-plis - participent aux dilatations parfois importantes et soudaines que provoque le passage du bol alimentaire. (Les micro-plis sont naturellement plus visibles dans la zone comprimée des macro-plis).



Artères. Les brusques variations de pression sanguine que les pulsions du cœur provoquent dans les artères sont amorties par la capacité de dilatation que procure le plissement de leurs parois.

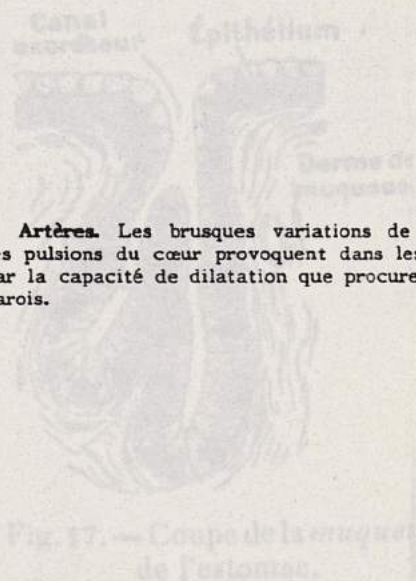
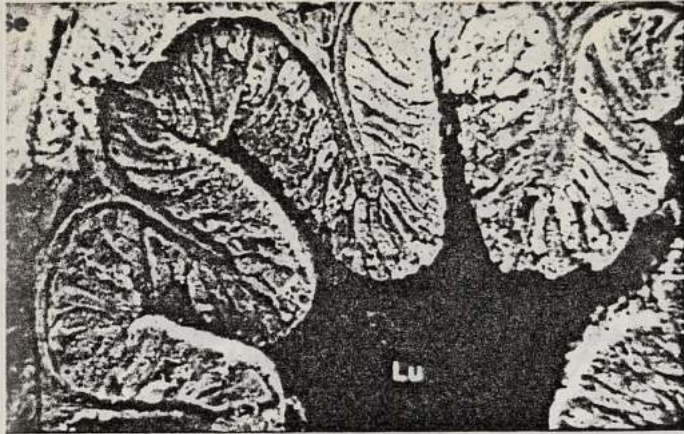
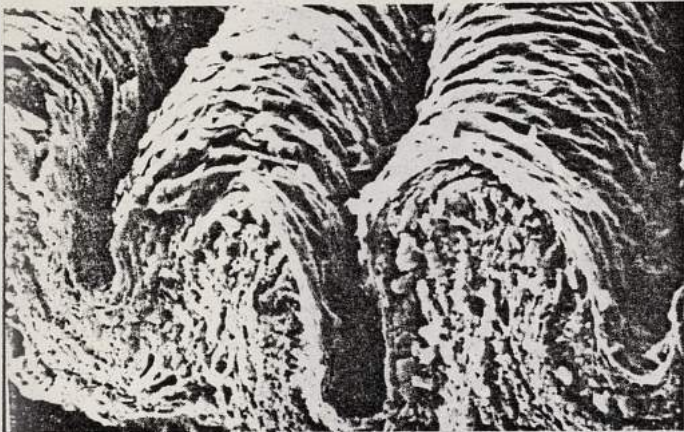


Fig. 17. — Coupe de la muqueuse de l'estomac.



Gros colon. Ses parois sont fortement plissées longitudinalement en accordéon étoilé régulier, ce qui permet de quintupler le diamètre restreint du conduit ici présent.



Vagin. Ses parois dilatables sont striées de micro-plis réguliers.



Bonnet. Parois fortement plissées longitudinalement et transversalement dans le second des quatre estomacs des ruminants.



Estomac. Les intenses replis de l'estomac sont bien sûr accordés à ses variations de contenance. C'est aussi au creux de ces plis que s'effectue la sécrétion des sucs digestifs.

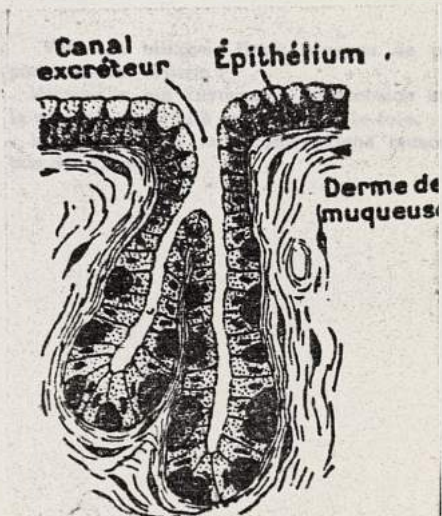
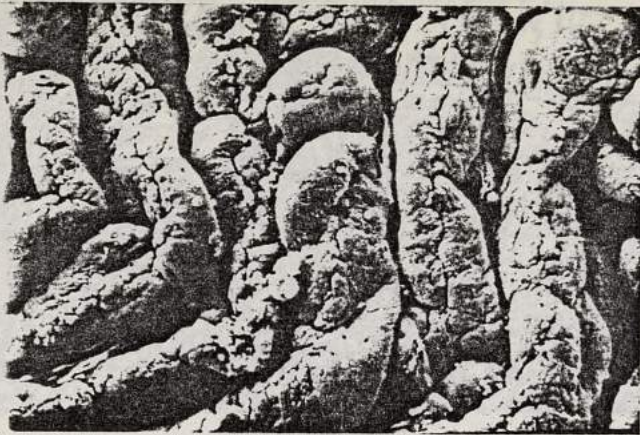


Fig. 17. — Coupe de la muqueuse de l'estomac.



Intestin. L'intestin grêle est tapissé de replis (ou villosités). Leur étendue surmultipliée favorise l'assimilation des substances nutritives. A l'intérieur de ces plis viennent de nombreux vaisseaux d'où le sang repart enrichi.

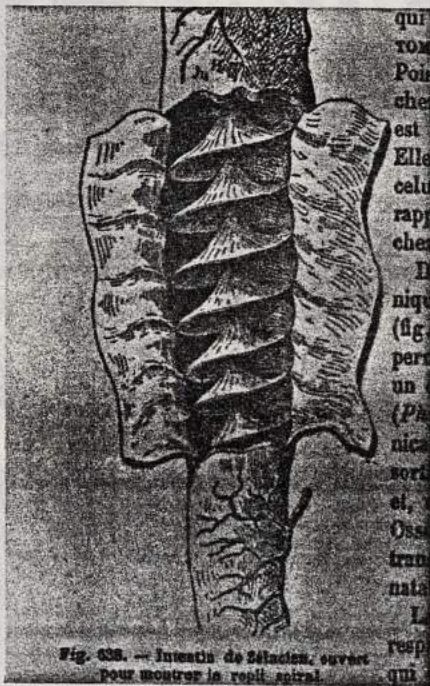
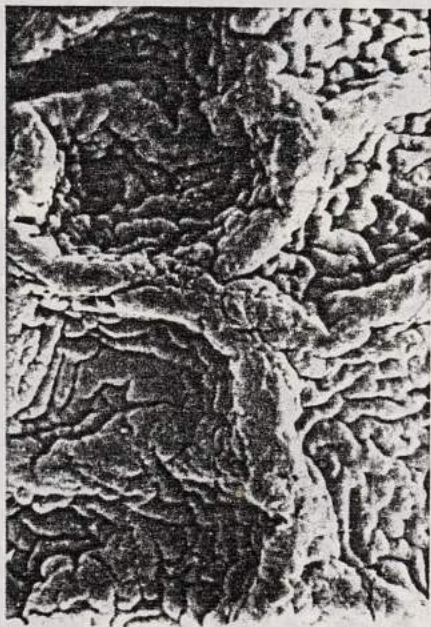


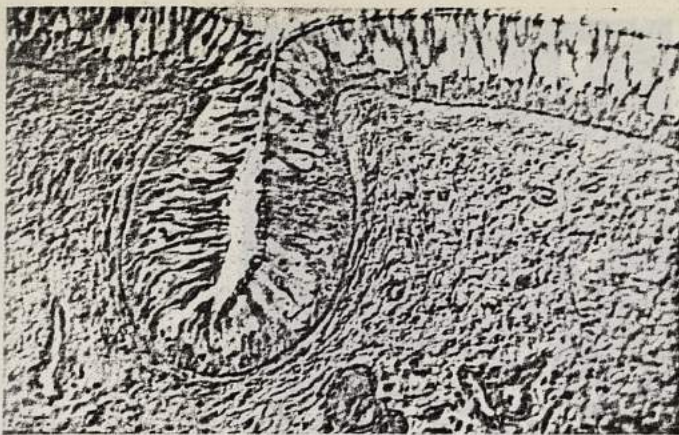
Fig. 638. — Intestin de Sélacien, ouvert pour montrer le repli spiral.

Intestins de sélaciens. Chez certains poissons, l'intestin possède à l'intérieur un repli spiral qui a pour effet d'augmenter le trajet intestinal et de favoriser l'absorption.

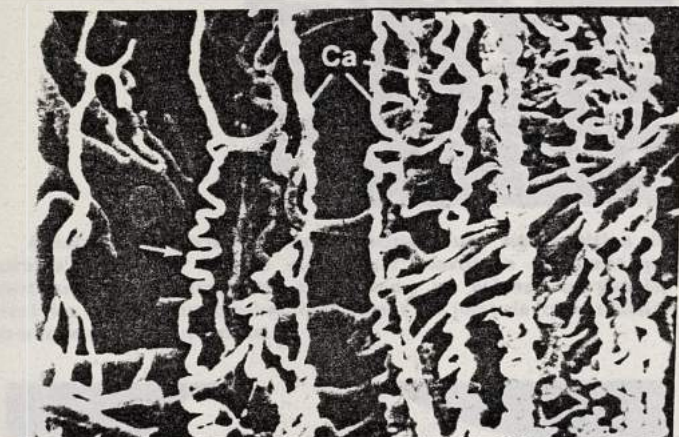


Vésicule biliaire. Deux niveaux de plissement sculptent les parois de cet organe :

- . Micro-plis qui favorisent l'absorption et la concentration dans la vésicule de la bile secrétée par le foie.
- . Macro-plis liés aux contractions musculaires qui évacuent la bile dans l'intestin.



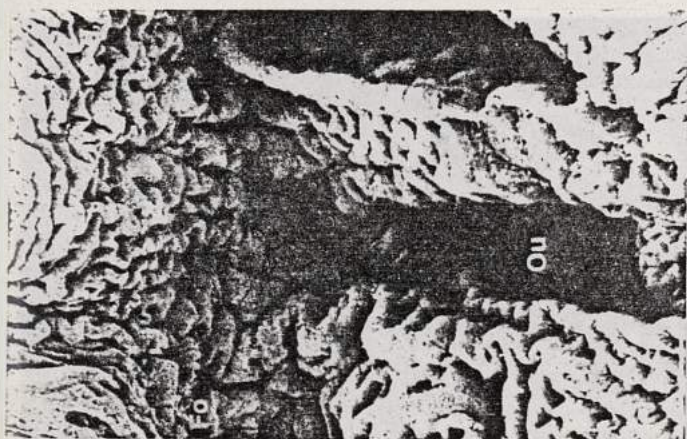
Muqueuse olfactive. La muqueuse olfactive chez l'homme est plissée, ce qui lui donne une étendue assez grande malgré sa petite taille.



Muscle. Les muscles sont de grands consommateurs d'énergie ; ils sont donc intensément irrigués de vaisseaux capillaires. Des replis leur permettent d'accompagner les contractions et extensions inhérentes au fonctionnement musculaire.



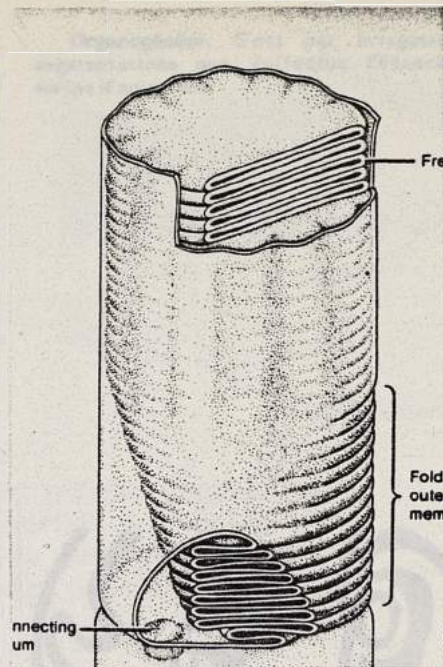
Trompes de Fallope. C'est dans les replis de cette muqueuse qu'est logée l'ovule avant sa fécondation (aussi celle-ci est-elle fort hasardeuse dans un territoire aussi labyrinthique).



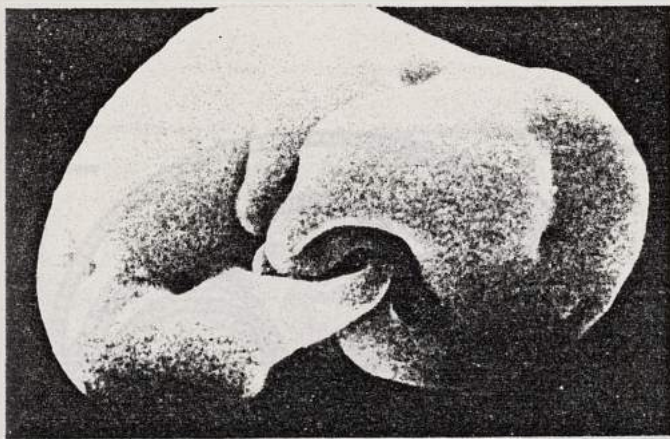
Vésicule séminale. C'est dans ces parois fortement plissées que sont secrétées, contenues puis expulsées les humeurs qui transportent les spermatozoïdes lors de l'éjaculation.



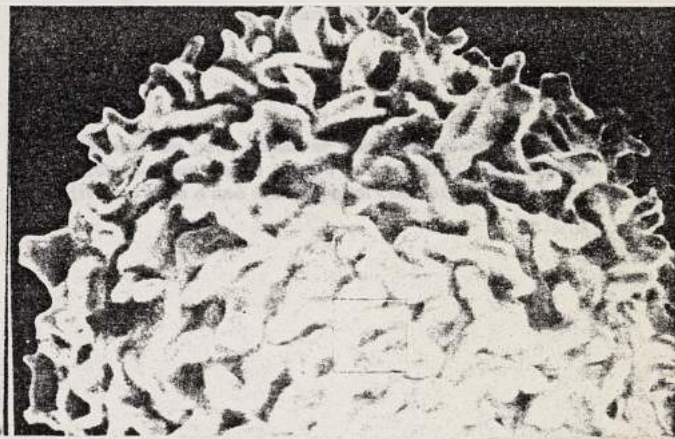
Cristallin. Le cristallin est constitué d'une superposition de strates élastiques. Chaque couche est constituée de fibres qui sont assemblées entre elles tout comme les pièces d'un puzzle, dont les "replis" limitrophes constituent un joint de type tenon/mortaise en queue d'aronde.



Cellule en bâtonnet de la rétine. Une succession de replis de la paroi empile, comme des assiettes, une succession de disques. Vers l'extrémité du cylindre, ceux-ci deviennent des unités autonomes renouvelables qui participent aux réactions photosensibles.



Globule rouge. Des convulsions plissantes se produisent au moment où le tout jeune globule rouge quitte le milieu médullaire qui l'a engendré.



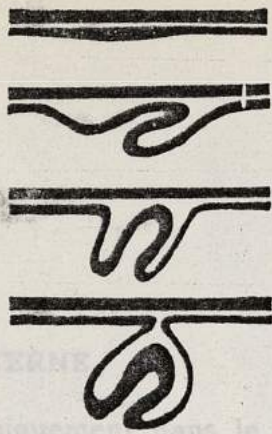
Globule blanc. Par leur rôle phagocitaire, les globules blancs, aux parois très souples, doivent pouvoir adopter des formes extrêmement variées, dont des états contractés/plissés qui peuvent aussi être occasionnés par les variations du PH sanguin.



Embryogénèse. Lors de l'embryogénèse chez les vertébrés, le développement de l'"œuf" initial s'accompagne d'une multiplication cellulaire par segmentation (Blastula) puis de différenciation (Gastrula). Par replis de l'exoderme (paroi externe) s'engendre l'endoderme (paroi interne) et un repli de ce dernier produit le mésoderme (paroi intermédiaire). Les transformations ultérieures de ces replis initiaux engendreront respectivement :

- . exoderme : l'épiderme et le système nerveux,
- . endoderme : système digestif et intestinal,
- . mésoderme : sang, muscles, reins, cœur, os, ...

Sur ce schéma de formation de la moëlle épinière chez les vertébrés, on constate comment l'exoderme, de pli en repli en gouttière, constitue finalement un tube autonome.

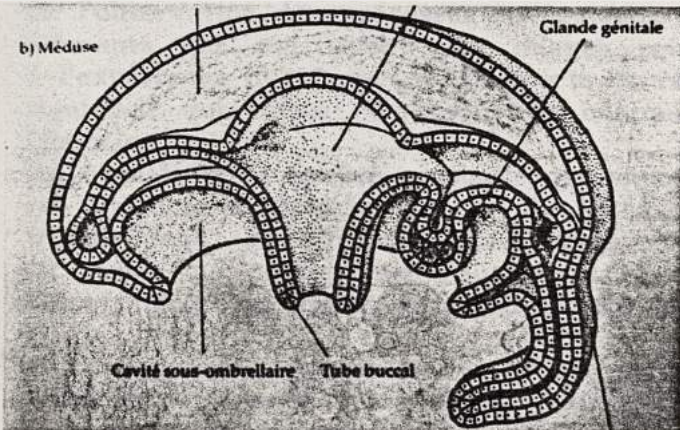


Dans la chrysalide rigide du papillon, la croissance est plus ou moins rapide selon les zones. Il en résulte des plissements qui sont des ébauches d'organes (d'après Eidmann, selon Weber).

Organogénèse. C'est par invaginations, replis, collages et segmentations que s'effectue l'ébauche d'organes chez toutes sortes d'animaux.

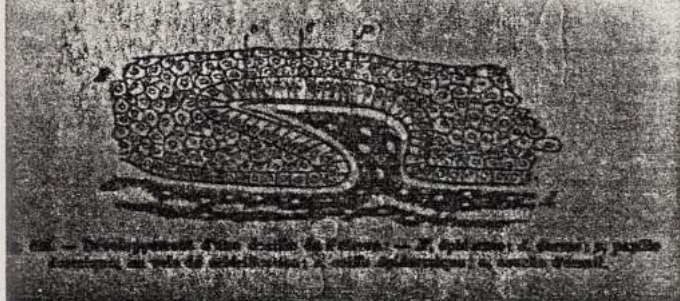


Le développement de l'œil humain.

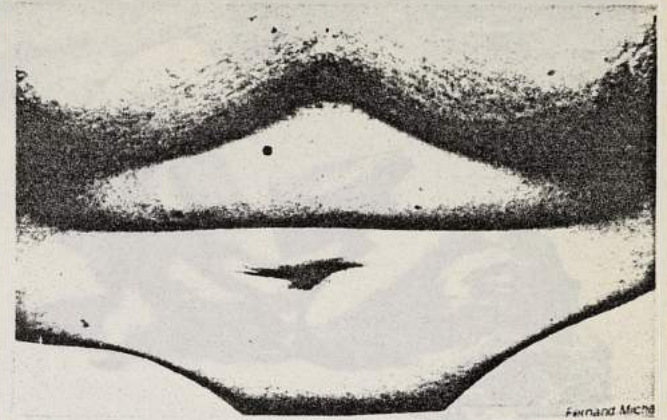


Méduse. On peut observer chez les formes animales élémentaires, comme sur cette coupe schématique de méduse, comment les divers replis d'une même paroi continue abritent chaque organe.

Cette construction primitive de l'épiderme est essentiellement conservée dans les écailles placodes des poissons, dont la structure rappelle tout à fait celle des dents, tant par leur origine que par l'ivoire dont elles sont en grande partie formées que par leur palpe intérieure, riche en vaisseaux et en nerfs. Chez les GANOÏDES les écailles primitives se fusionnent de façon à



Écaille. Formation d'une écaille de poisson par replis du derme qui pénètre dans l'épiderme. Ce repli se coiffe d'un capuchon de cellules sclérifiées qui finissent par percer l'épiderme.



ANATOMIE EXTERNE

Ce n'est pas uniquement dans le but d'exposer quelque nouveau principe morphologique que les quelques plissements superficiels du corps humain sont présentés ci-après, ni encore parce que certains de ces mécanismes dont nous sommes effectivement constitués sont tellement familiers que le concepteur les applique instinctivement dans ses fabrications, mais surtout parce que, à tout ce que leur forme révèle objectivement dans une vision strictement mécaniste, s'associe une réaction sensible, subjective, tant ces dispositions inscrites dans notre corps nous sont familières et nous touchent de très près.

Des situations permanentes, nécessairement vécues, ressenties dans notre chair sont intériorisées et, qu'elles soient ou non lucidement réfléchies, donnent lieu à des réactions affectives, des interprétations symboliques, voire même des croyances occultes. S'exerce là une logique complexe de transposition, le passage de l'observation des processus perceptibles de la nature comme éléments qui constituent des images primordiales communes à l'expérience de chacun, en supports et références du discours signifiant qui réussit à établir la communication, à produire l'émotion.

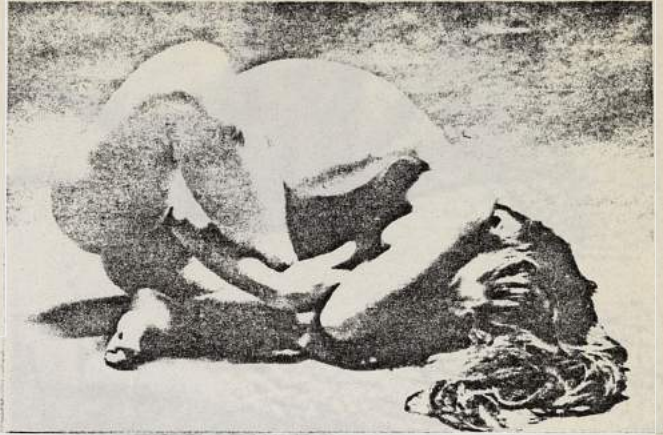
On connaît là la qualité sensuelle des phénomènes épidermiques, les intimités dissimulées par le pli, la vérité de l'apparence qui traduit "fond" (et reflèterait alors la personnalité), la trace présente du passé (qui permettrait d'augurer de l'avenir), la fatigue qui use et abîme, les forces qui assujettissent, l'accident, le singulier, etc...

Il est important que de tels facteurs, essentiellement affectifs, soient pris en compte dans toute fabrication, lui procurant alors toute sa vérité humaine.

Quelque importance est accordée à la main, auxiliaire de notre volonté, facteur de nos propriétés, vecteur de notre empreinte sur le monde. C'est l'outil mobile par excellence, agile, précis, nuancé, interprète de notre sensibilité, la preuve de notre personnalité... Le pli raconterait tout cela, depuis l'empreinte digitale, les rides des phalanges, les lignes de la main...

Mais, avant d'oser de telles généralisations, n'y a-t-il pas lieu, afin de fonder solidement tout propos, d'observer comment et pourquoi ces données s'organisent ?

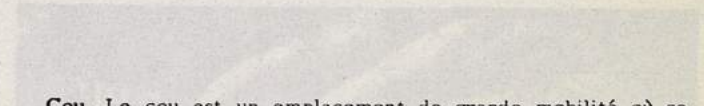
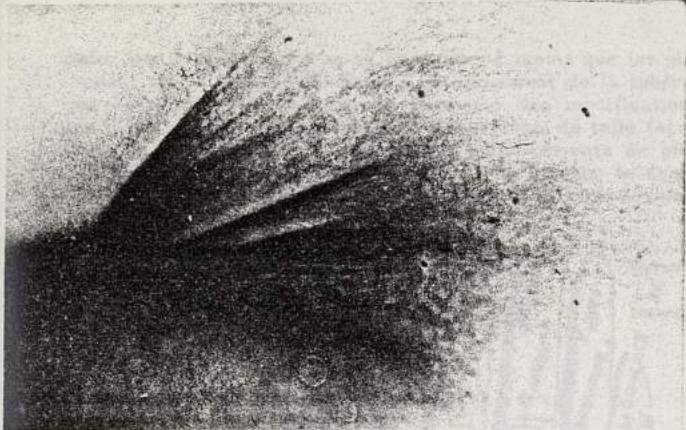
Ce sont encore là des caractéristiques importantes de l'apparence que le dessinateur ou le sculpteur s'applique à reproduire fidèlement, et qui enrichissent son verbe expressif.



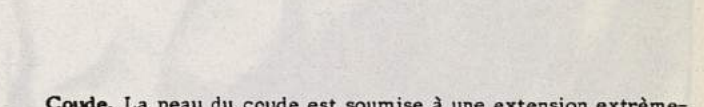
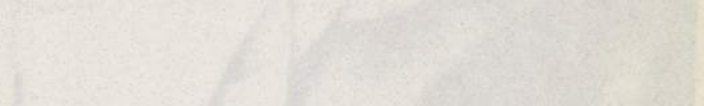
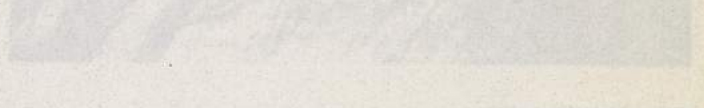
Corps. Un corps est d'autant plus pliable qu'il est mince - et d'autant plus mince qu'il se ramifie. Ainsi, de tronc en épaule ou bien aine, coude ou genou, poignet ou cheville puis doigts observe-t-on une pliability de plus en plus accentuée, capable de jouer de plus en plus librement vers le milieu extérieur (logique naturelle puisque c'est bien à leurs extrémités limites que les choses "changent" le plus radicalement et sont donc le plus sollicitées).

Cette progressivité d'aptitude au jeu se manifeste donc par une quantité de plis qui va croissant vers les extrémités.

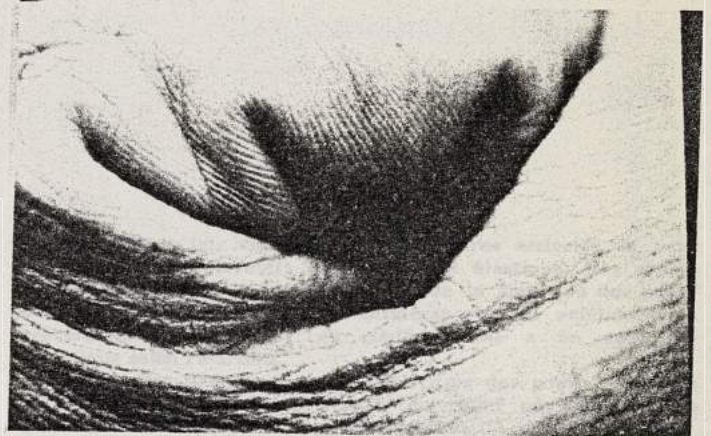
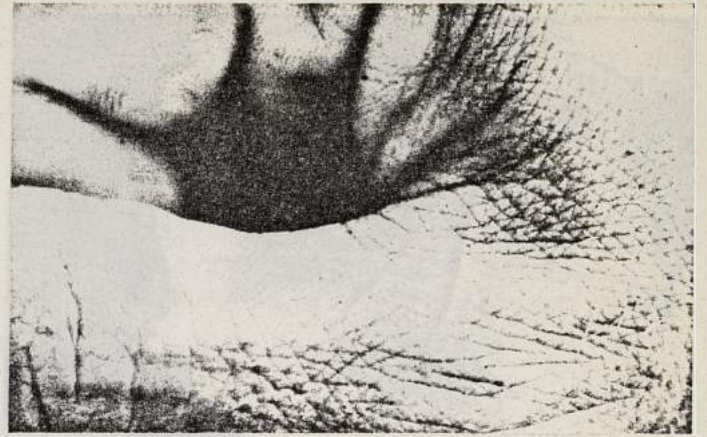
A quelque emplacement du corps qu'ils se réalisent, ce sont les plis rentrants qui se gravent définitivement dans la peau. Ce sont effectivement les emplacements de l'épiderme les plus intensément pliés ; Les plis saillants le sont nécessairement beaucoup moins à cause de leur contenance interne obligée.



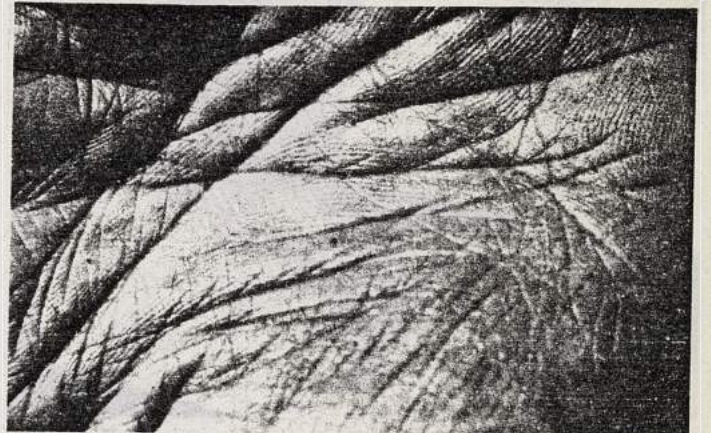
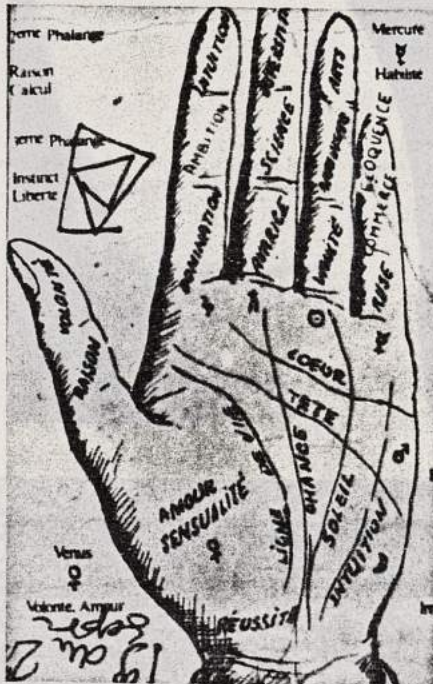
Cou. Le cou est un emplacement de grande mobilité où se concentrent des aptitudes à la flexion et à la torsion. Le pli montre bien que chacun de ces cas de travail doit se comprendre comme une conjugaison de traction et de compression.



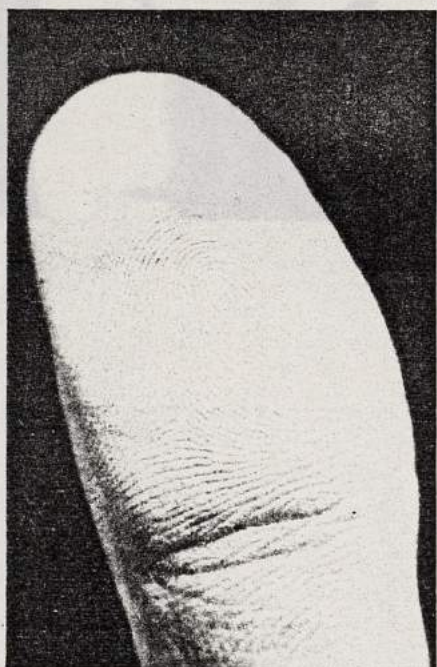
Coude. La peau du coude est soumise à une extension extrêmement importante dans toutes les directions de la protubérance sphéroïde de l'olécrane. A l'inverse sa contraction s'effectue selon toutes sortes de directions qui engendrent une complexité homogène de plis (où transparait cependant préférentiellement l'orientation de la charnière).



Main. Une surface close ne se plie pas - à moins que les plis ne bougent sur la surface (exemple : retournement de la sphère) ou que l'élasticité de la paroi ne permette des modifications locales. C'est ce qui se réalise le plus fréquemment, de telle façon que les plis se gravent à la longue aux emplacements de plus intense variation. Leur distribution reflète à la surface le degré de liberté articulaire interne (généralement unique, parfois double).

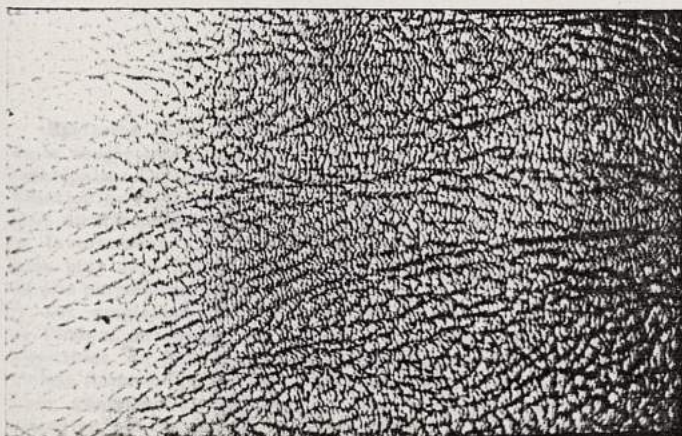


Paume. Les lignes de la main témoignent effectivement de l'activité. Aucune base morphologique, mécanique ou psychologique ne vient cependant étayer les interprétations simplistes, voire fantaisistes de la chiromancie. Ainsi bifurcation signifierait ambiguïté, alors qu'il est inéluctable qu'en certains emplacements trois plis rentrants soient incidents à un pli saillant (face concave de la fronce, orientée pareillement à la paume de la main) - et tout à l'avenant...



Empreintes. Ici, comme en bien d'autres endroits, la peau repose sur des bourrelets qui la rendent élastique. Ces reliefs ne sont situés qu'à la face intérieure de la main (ou des pieds) où ils constituent des reliefs antidérapants qui améliorent la préhension. Chaque de ces configurations a un caractère spécifique selon l'individu. La distribution des lignes et la répartition des points singuliers correspondent aux caractéristiques du relief en même temps qu'aux directions prioritaires de déformation.

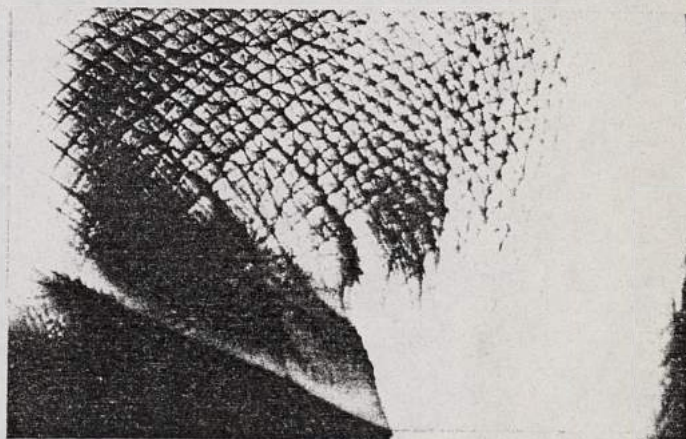
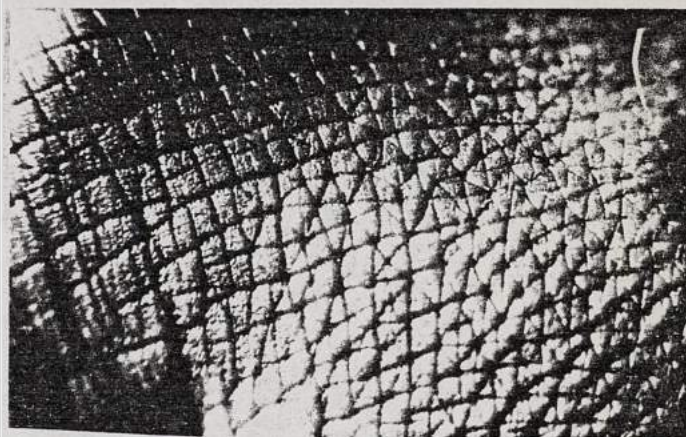
Grain. La texture de ce cuir - qui désigne ses directions de souplesse - constitue aussi un motif expressif à caractère plastique.





Phalanges. Conformément au modèle de la fronce de repliabilité minima (3 plis saillants incident à un pli rentrant) et du pliage d'un cylindre, on observe, dans les plis de cette articulation à fort débattement du pouce, le quinconce des plis rentrants qui s'insère entre le zigzag des nombreux plis saillants.

L'articulation interne du majeur se réalise ici par une séquence de plis curvilignes en créneau qui "meurent" à la mi-cylindre, ligne neutre de la flexion (conformément au modèle en papier plié ci-adjoint)



Epiderme. Ces micro-plis sont à la fois le signe et la raison de la souplesse de la peau. Ils sont perpendiculaires aux directions principales d'extension et de rétraction et leur répartition est fonction de l'importance des sollicitations. (Par dualité une extension directionnelle s'accompagne d'une rétraction perpendiculaire et inversement. Or, tout mouvement simple se réalise dans un sens puis dans l'autre. Aussi la peau est régulièrement marquée de plis perpendiculaires).

A cet emplacement très "mouvementé", situé entre le pouce et l'index, on observe le passage d'une zone peu sollicitée (deux directions de plis perpendiculaires) à une zone extrêmement mobile (imprimée d'une forte multidirectionnalité de plis).

Leur cheminement général est une transition qui raccorde la direction des macro-plis articulaires à celle des fines empreintes digitales.



Paupières. La paupière est le modèle vivant de la familière fermeture en capote. Ce double éventail curviligne réalise un obturateur extrêmement souple, des plus instantané. Sa fermeture s'accomplit par contraction du muscle orbital qui prend alors la disposition géodésique de plus court chemin, l'arc de grand cercle.

Voici le visage sur le site de l'expressivité par contraction. La ligne des muscles s'échelonne fonctionnelle, de nombreux micro-plis et macro-plis qui sont les supports de la plus grande variété de expressions. Les plus importants sont perpendiculaires à la direction de contraction des muscles orbiculaires à la bouche, sur le visage le caractère de l'expression, qui accentue encore le rapprochement de la vision.



Oreille. Un ourlet périphérique limite l'oreille et structure cet appendice assez peu consistant. Selon Schwenck, les replis intérieurs capteraient et canaliserait les ondes sonores.



Lèvres. La bouche est limitée par un muscle circulaire en sphincter : des micro-plis et des macros-plis qui constituent les ondes labiales supérieures se situent perpendiculairement à la direction de contraction des muscles orbiculaires.



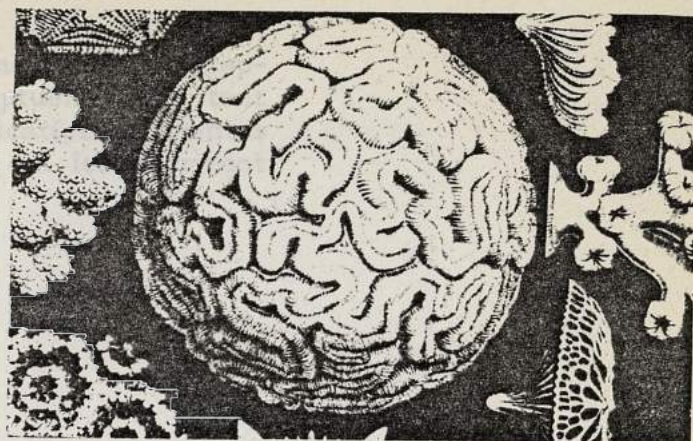
Faces. Le visage est le lieu de l'expressivité par excellence. En plus des muscles exclusivement fonctionnels, de nombreux muscles n'ont d'autre utilité que cette expressivité. Des plis, toujours perpendiculaires à la direction de ces muscles impriment à la longue sur le visage le caractère de l'individu, qu'accentue encore le flétrissement de la vieillesse.



H. Apes, Carris Fig. 410

LA LUBRICITÉ : TRANSVERSE DU NEZ
Orbiculaire des yeux et grand zygomatic





COMPACTAGES

Au même titre que toute modalité de distribution spatiale, le principe d'empilement compact (qui consiste à agencer une certaine quantité d'éléments dans un espace donné) est une réalité permanente qui se rencontre en toute organisation matérielle, participant directement à sa cohésion.

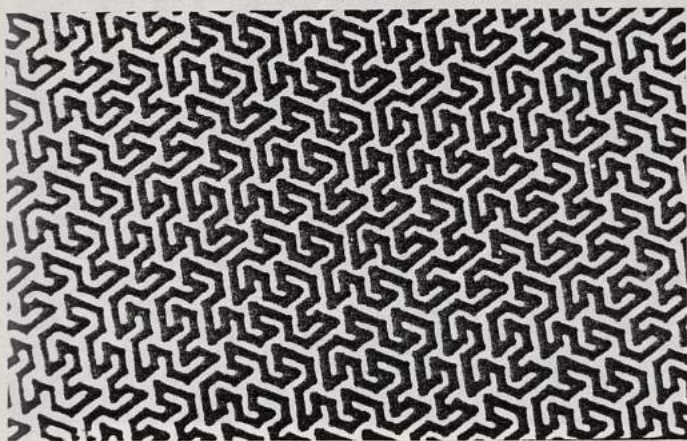
La réduction des distances que réalise un compactage est corollairement le gage d'une plus grande rapidité pour toute espèce de transmission, et donc généralement synonyme d'efficacité.

La répétition d'éléments identiques (fait généralement associé au phénomène de reproduction) est un autre principe de nature, qui existe par raison d'économie, tant qu'à un même problème se justifie la production de la même solution. Ceci donne toutefois lieu à une richesse extrême de configurations selon la nature des éléments à répartir et les lois de composition qui peuvent s'établir, orchestrées par une combinatoire qui est à l'origine de la diversité de l'univers. Aussi, ce problème de partition de l'espace est-il une base fondamentale de la morphogénèse, qui intéresse biologistes, physiciens, mathématiciens, artistes, techniciens.

Toute configuration que l'on considère comme linéaire est à envisager soit comme limite d'une étendue bidimensionnelle, soit comme parcours d'un objet ponctuel qui évolue dans l'espace et dans le temps. Sa matérialisation revêt forcément de l'épaisseur. Qu'une telle bande de calibre quasi constant ait à se répartir en une étendue limitée qui la contienne, la ligne, prenant parfois directement appui sur elle-même à défaut d'autre support, se love en méandres dont la distribution peut être extrêmement diversifiée, rapidement labyrinthique. Un virage manifeste généralement la recherche d'un ailleurs éventuellement occasionné par un obstacle ou l'influence d'un tropisme ; une bifurcation est une propension à l'expansion spatiale ou bien une collision réunissante, selon l'orientation par laquelle il faut considérer le processus formateur.

Que ces tracés s'établissent en segments isolés, en circuits, en réseaux connexes (arbres ou semi-treillis) leur agencement relève essentiellement d'une logique topologique, où incidence, contiguité, continuité sont des caractéristiques formellement plus déterminantes que des données métriques (largeur constante, variation de courbure...)

Même lorsqu'il ne s'agit pas de pliage au sens propre du terme, de telles configurations s'y apparentent fonctionnellement, perceptivement, psychologiquement et même conceptuellement, tant leurs caractères intriqués ressemblent aux complications inhérentes au pliage, ce dont témoignent bien les mots qui les décrivent en divers ouvrages.



Courbe fractale. Les formes fractales, qui naissent de la répétition systématique d'un processus de transformation se heurtent à des paradoxes liés au discontinu et à l'infini (comment décrire les variations d'une courbe à tangente indéterminée, quel est l'état limite d'une forme de répétition...)? Ces difficultés conceptuelles s'évanouissent dès lors que l'on concilie l'abstraction mathématique toute théorique et la réalité matérielle, qui est notre omniprésente vérité. Alors, contrairement à certains a priori et à certaines échelles d'observation, un espace unidimensionnel parvient à remplir le bidimensionnel, tout en introduisant la notion de dimension spatiale fractionnaire.

Ainsi cette obsédante ligne brisée (de dimension $1,1291$), qui, avec l'obstination d'une même règle aveuglément répétée, en vient par plis et replis à occuper le plan selon un ordre dont la raison nous échappe rapidement.

On observe bien pourtant que ces notions font référence à quelque expérience courante, et sont de nature à éclairer maintes fabrications.



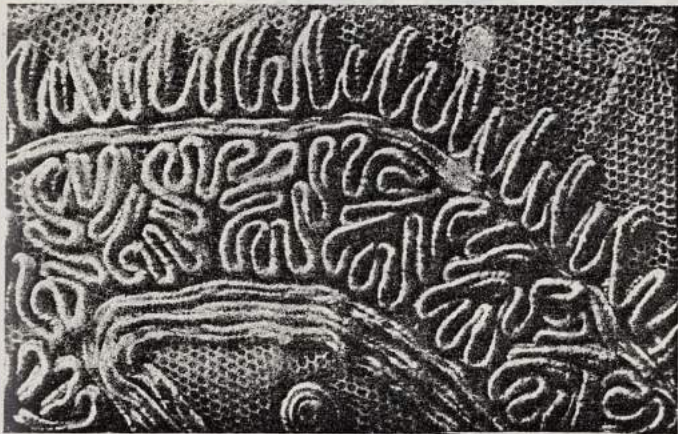
Domaine magnétique du grenat. Des unités dont l'attraction est bipolaire (pôles nord et sud) s'associent nécessairement en chaînes linéaires de largeur constante qui "jouent des coudes" pour occuper le terrain.



Méandrine. Les polypes qui vivent en colonie sécrètent chacun leur part de ce squelette collectif. Il s'engendre par scissiparité incomplète et se développe donc en longs rubans dont la largeur correspond au territoire vital de chaque polype. Une rangée avance ou recule sous l'incessante pression des voisines.

Cette boule se dilate par l'extérieur : lorsque la largeur entre les bandes devient trop importante, un méandre ou un nouveau branchement vient combler les interstices. (Imaginer ainsi la complexité tridimensionnelle arborescente et plissée que révélerait une coupe !)

Dent. Des sillons d'émail très contournés remplissent l'étendue pour constituer la table d'usure homogène d'une dent de labyrinthe (Batracien fossile géant).



Ils sont inférieurs à ces 2 groupes
comprenaient des parties ossifiées
Les Stégocéphales avaient des

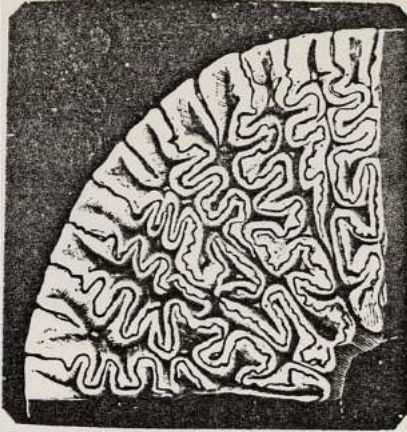


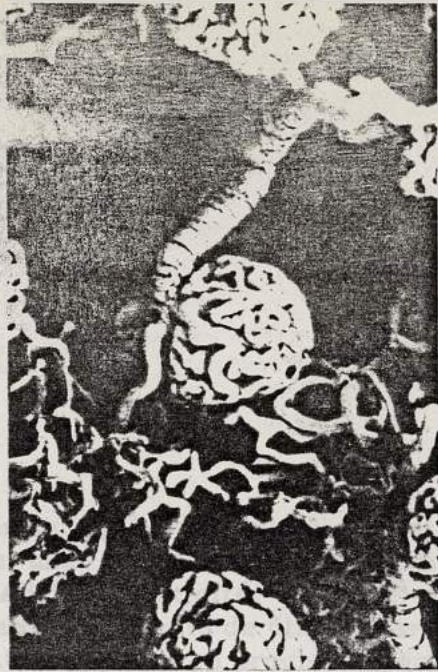
Fig. 490. — Un quart d'une dent de Labyrinthodonte.

Broderie. Occupation consciencieusement répétitive d'une broderie ancienne.

Cervele de mouton. Chez les espèces évoluées, la surface cérébrale est fortement plissée afin de loger les myriades de cellules du cortex.

Les replis forment les ramifications d'une configuration spatiale arborescente, archétype universel de la différenciation dans une croissance continue.

Intestin grêle. Huit mètres de viscères parviennent à se loger par replis. (En regard de l'extrême diversité de dispositions possibles d'une ligne sur une surface, essayer de considérer la nouvelle richesse vertigineuse qu'autorise le tridimensionnel).



Système rénal. Ces agglomérations de vaisseaux sont les lieux où s'effectue le filtrage du sang. Ces concentrations ne sont pas que de simples capillaires repliés, mais le lieu de ramifications multiples qui favorisent ainsi les échanges.

À QUOI RESSEMBLE UNE PROTÉINE REPLIÉE



La structure d'une protéine dans l'espace est déterminée par les liaisons qui se produisent entre les chaînes des acides aminés. Ici, il s'agit de la ribonucléase, une petite protéine de 124 acides aminés, dont l'architecture bien connue est déterminée par quatre liaisons disulfides (S-S, en noir sur le dessin). Mais interviennent également des liaisons moins fortes, telles que les liaisons hydrophobes ou les liaisons hydrogène.

Protéine. Les propriétés d'une structure tiennent à la nature de ses relations. Cette évidence générale est manifeste en chimie, à chaque échelle d'observation (cohésion d'un cristal, agencement des molécules, répartition atomique, réaction chimique...).

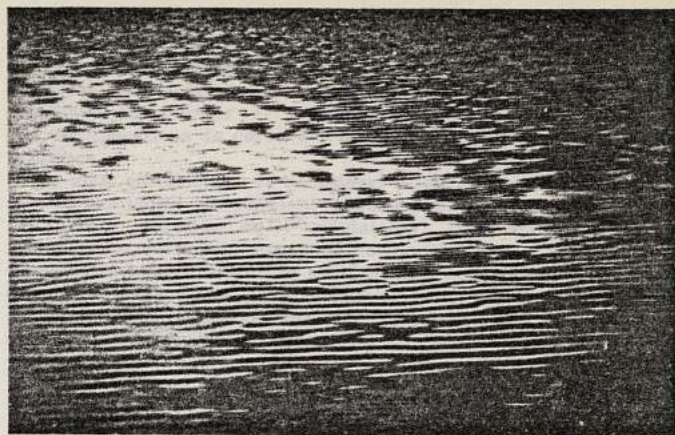
Une protéine est une longue chaîne d'acides aminés. Par le jeu d'affinités diverses entre ses corps constitutifs, de nouvelles relations s'établissent et le ruban se replie dans l'espace. Cette nouvelle structure engendre une autre molécule aux propriétés originales.

On cherche, par l'exploration systématique de tels plisages à fabriquer des remèdes.



A.D.N.. La densité et la complexité des relations qui s'établissent dans la chaîne de l'A.D.N. lui imposent une structure compliquée (avec des plis). Son vrillage permet d'emmagasiner énormément d'informations dans un espace restreint à l'extrême. Son "pliage" hélicoïdal est aussi une forme auto-duplicante (autre propriété inhérente au pliage) qui assure la reproduction fidèle, c'est-à-dire la transmission du message génétique.

Un simple ruban plié en hélice fait ici comprendre la densité d'un tel compactage, qui se réalise à deux niveaux : vrille de l'A.D.N., lui-même "surenroulé".



FLUIDES

Entre un matériau rigide (donc cassant) et la fluidité intégrale, il existe toute une gamme de comportements intermédiaires de la matière (élasticité, plasticité, viscosité) et qui donnent chacune lieu à une modalité différente de pliage. Parmi toute ces consistances, on parvient, de proche en proche, à percevoir des ressemblances de conformations, des similitudes de comportements et à établir des parentés entre les processus qui déterminent les formes en ces divers milieux (le pliage, d'ailleurs, se réalise souvent par le jeu de ces différences de consistance du dur et du mou et l'on sait produire une mise en pli en changeant localement voir momentanément l'état du matériau).

La dynamique des fluides, dans l'analyse des écoulements liquides et des flux de forces qui les véhiculent, est une base d'explication de bien des familles de formes (tout objet, avant d'être solide, a existé à l'état liquide et conserve quelques traces des états qu'il a traversés). C'est singulièrement le cas des formes organiques qui se constituent par transfert d'une matière fluide qui se dépose pour se solidifier parfois - formes organiques qui doivent nécessairement obéir aux règles du milieu plus ou moins fluide où elles évoluent.

Qui n'a déjà observé le télescopage de deux masses fluides incompressibles dont les turbulences se perdent en replis labyrinthiques ? On peut aussi voir dans l'embryogénèse la formation d'organes s'accomplir par une prolifération de cellules engendrant les replis des membranes ecto, meso et endodermiques, qui baignent en milieu à dominante fluide.

Le drapeau agité par le vent suit les masses d'air qui se propagent en train d'ondes, et le pli composé doit se comprendre comme la résultante d'influences diverses qui se conjuguent spatialement, à la manière de systèmes d'ondes qui interfèrent. On est ici à l'intersection de deux ensembles de causes formatrices qui déterminent le registre des formes communes au pliage et à l'hydrodynamique.

Il n'est en définitive de meilleure compréhension des formes que lorsque l'on établit des rapprochements entre des processus distincts, qui peuvent influencer chacun à des échelles fort diverses.

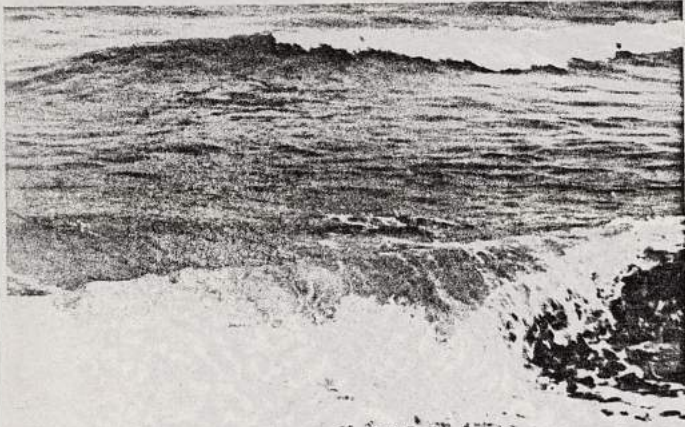
Sont ici présentés des mouvements de fluides qui peuvent s'apparenter ou se conjuguer au pliage, participant à la genèse de formes en divers domaines de la nature.



Ondes. La périodicité concilie la variation (i.e. interaction et modification) et la continuité (i.e. conservation répétitive). Ce phénomène, très général, régit maintes situations temporelles, spatiales et matérielles. Il se manifeste avec évidence sur les domaines superficiels et dispositions d'interface, y imprimant des configurations de caractère universel, quel que soit le support matériel.

Il est ainsi enrichissant de considérer le pli à la lumière des effets hydrodynamiques, qui révèlent beaucoup de parentés étant donné le facteur commun de l'"ondulatoire" (fréquence, amplitude, interférence, réflexion, concavité/convexité).

Plus abstraitement, enfin, le pli n'est plus nécessairement à considérer ici comme une peau continue, concrètement interrompue par ploiment, mais comme une singularité qui se manifeste dans un processus de transformation.



Vagues. Il faut mécaniquement comprendre l'origine du déferlement comme l'action de deux champs de forces contraires. Au sein d'une masse continue, le moment de ces forces se résout en une alternance périodique d'enroulements.

Les catastrophes déformées sur l'espace W associées à des conflits de régime 93

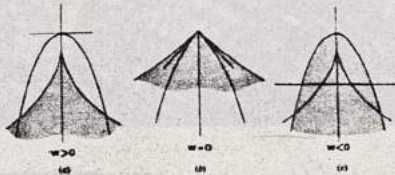


Fig. 5-17. Sections successives du déferlement d'une vague.

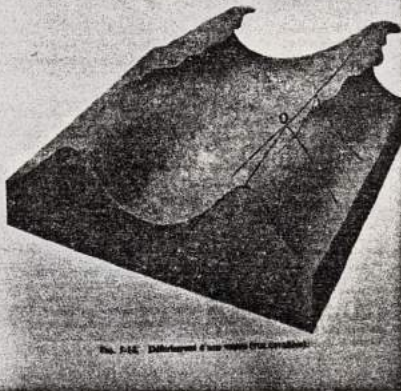
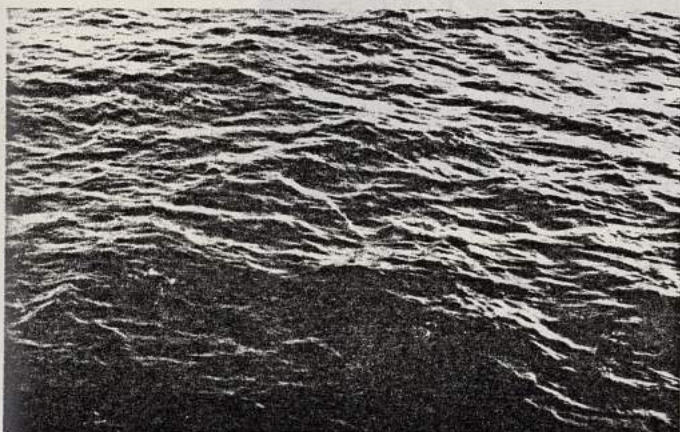


Fig. 5-18. Déferlement d'une vague (vue tridimensionnelle).

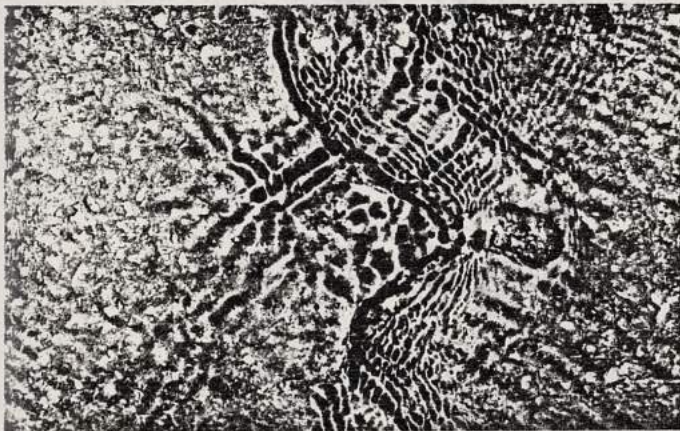
Déferlement. Une suite de sections perpendiculaires à l'onde de cette vague présente une évolution qui reflète la dynamique des régimes d'équilibre entre les flux de forces qui transportent les masses fluides - Etant donnée la continuité de la transformation, il est physiquement inévitable qu'au delà de la singularité que marque nettement le pli, la vague déferle. Le pli marque ici le seuil critique entre des zones de stabilité et d'instabilité. (Il s'agit selon la théorie des catastrophes, d'une morphologie modélisant une situation de bifurcation qui résulte d'un conflit d'"attracteurs".)



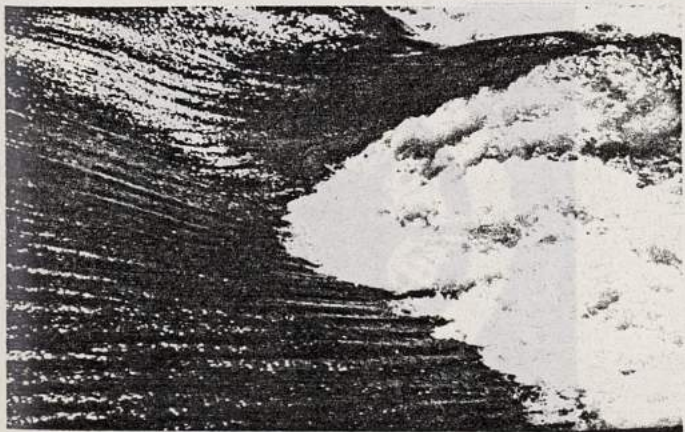
Interférences. Deux trains d'ondes interfèrent (le second étant la réflexion du premier sur la rive). En certaines situations de phase, il se dessine un véritable chevron, motif qu'il faut d'ailleurs comprendre en pliage comme la conjugaison de deux directions en "accordéon".



Houle. Tel un intense chiffonnage, une grande complexité d'ondes (et donc d'actions) interfère ici.



Rides. Le fluide mobile franchit un obstacle fixe. Un système d'ondes quasi stationnaires s'établit, oscillant autour d'un régime stable de régulation des flux. Moyennant quelques modifications, ces rides pourraient se réaliser par pliage, en disposant une très fine membrane à la surface de l'eau.



Goulet. Avant cette chute, les rives de la rivière se ressèrent pour rassembler les eaux. Celles-ci sont soumises à une brusque "contraction" latérale qui, comme en pliage, engendre des rides longitudinales.



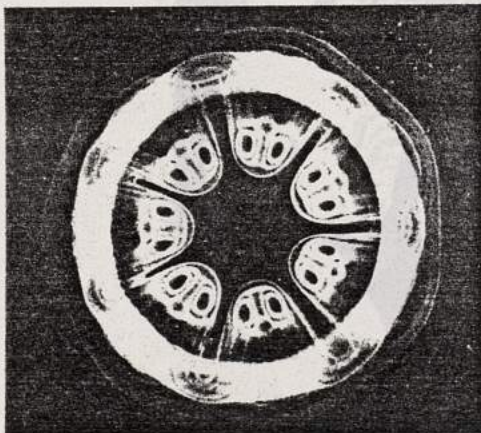
Détail agrandi des lamelles osseuses dans l'organe olfactif du chevreuil.

Turbulences. Moment des forces, compatibilité d'orientation des flux, phénomène du point fixe dans une transformation sont quelques données déterminant les évolutions de ce fluide très volatil (de très faible viscosité). A l'exception des vortex et des sinuosités périodiques localement ordonnées, ce mouvement évolue globalement en méandres aléatoires. La complication apparente en surface n'est qu'un pâle reflet de l'extrême complexité intérieure, qu'il faut de plus considérer en mouvement... Seule la continuité de transformation qui dans un premier temps affecte de telles évolutions permet d'y percevoir quelque ordre, en référence aux génèses par replis successifs.

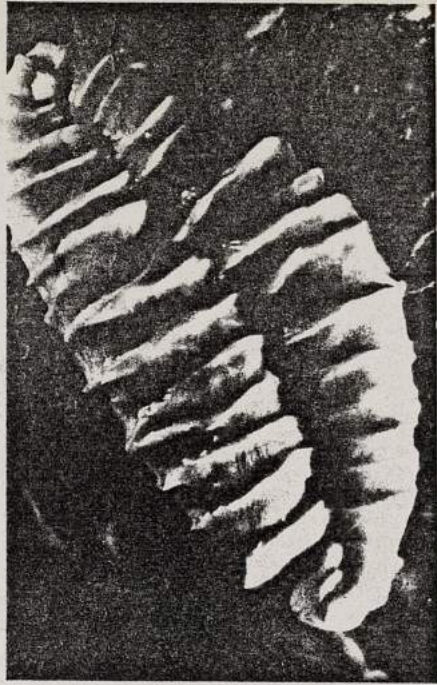
Météorologie. Les invaginations qui s'organisent successivement dans les mouvements conflictuels de masses fluides se réalisent avec quelque progressivité, mais non sans discontinuité (un "pli" au moment où, comme par organogénèse, un domaine autonome va se constituer.



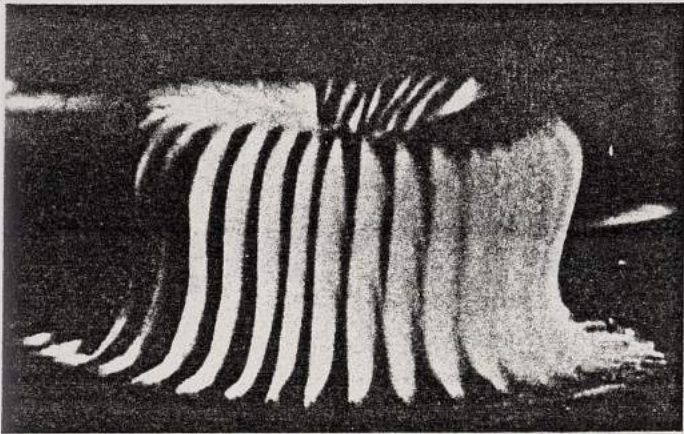
Des langues d'air froid s'insinuent dans une zone plus chaude (d'après Rossby).



Tache. Une goutte d'eau colorée se propulse en tourbillon annulaire. Celui-ci, vu en plan, par un jeu complexe d'interfaces de qualité différente (mouvements, viscosité ...) évolue bientôt en replis étoilés, témoins de l'instabilité du phénomène de "splach".



Cymatique. Une pâte visqueuse est soumise à des vibrations qui engendrent un déplacement permanent de la matière. A certaines fréquences, les trains d'ondes s'organisent en réseaux stationnaires. Les rides se marquent alors en plis nets aux emplacements de résonance (c'est-à-dire de superposition d'effets harmoniques). Ainsi sous l'effet d'influx vitaux pourrait s'expliquer la genèse de certaines formes organiques.



Feuilletage. Quelques couches de pâte à modeler pliées, repliées et surpliées au hasard engendrent un feuilletage dont la distribution spatiale pourtant continue échappe bientôt à l'entendement, même lorsqu'on l'observe comme ici en coupe : que de complications (au sens étymologique du terme)...



2

PRINCIPES STRUCTURANTS DU PLI

JEAN-MARIE DELARUE

SOMMAIRE

INTRODUCTION

FORME PLIÉE, DISPOSITION GEOMETRIQUE ET STRUCTURE

1 ORGANISATION SPATIALE ET CONSTRUCTIONS A RESISTANCE DE FORME

2 LE PLIAGE ET LES GEOMETRIES

2.1 Modèle topologique

INTRODUCTION

Ce chapitre procède à l'inventaire et à l'analyse des effets structurants du pli selon une optique qui, au-delà de leurs rapports directs avec les systèmes plissés, permet plus largement de traiter les fondements généraux de composition structurale, et en particulier les principes de résistance par la forme applicable à toute espèce de construction.

S'y développent les notions premières, conformes au bon sens et à l'expérience usuelle en fonction desquelles, préalablement au calcul, germe et s'élabore un projet constructif - (il s'agit essentiellement d'une approche des éléments de géométrie, mécanique, statique et résistance des matériaux qui président à la conception des systèmes structuraux.)

Ces données sont argumentées de façon à pouvoir s'étayer d'expérimentations sur modèles de simulation, tant cette méthode s'avère fructueuse et pour l'étude analytique et pour la conception structurale - La majorité des expériences proposées sont à réaliser en papier : il est peu de matériau aussi usuel, familier, économique, et de mise en œuvre simple et immédiate. (On sait d'ailleurs, moyennant une connaissance approfondie des divers matériaux, transposer les effets observés à d'autres réalités que l'objet manipulable en papier.)

Il est recommandé de fabriquer les modèles indiqués avec du papier à lettre ordinaire, car sa relative faiblesse permet d'exprimer tangiblement comment exploiter judicieusement la résistance de ce qui n'en possède guère, et d'observer les modalités de déformation ou de rupture, aussi instructives ici que la performance.

L'éventail des expériences proposées a été établi de façon à faire entrevoir la diversité des configurations engendrables par pliage et la multiplicité des systèmes constructifs qui en découlent, en demeurant toutefois dans l'élémentarité qui facilite l'étude en profondeur, avant d'accéder progressivement à la complexité. Il s'agit de suggestions qui doivent ouvrir des perspectives d'exploration.

La présentation est celle d'un traité didactique méthodique pouvant servir de référence à l'étudiant comme à l'enseignant car les ouvrages sur le sujet sont quasiment inexistant. Aussi le niveau des considérations développées est-il multiple, en vue d'intéresser le débutant comme le spécialiste.

PLIS ET RELATIONS GEOMETRIQUES A CARACTERE STRUCTURAL

1.1 Connexité

1.2 Orientation

1.3 Courbure

1.4 Dualité

1.5 Discontinuité

1.6 Intersection

1.7 Multidimensionnalité

1.8 Mécanique

1.9 Géologique

1.10 Résistivité

SOMMAIRE

INTRODUCTION

FORME PLIEE, DISPOSITION GEOMETRIQUE ET STRUCTURE

1 ORGANISATION SPATIALE ET CONSTRUCTIONS A RESISTANCE DE FORME

2 LE PLIAGE ET LES GEOMETRIES

2.1 Modèle topologique

2.2 Modèle projectif

2.3 Modèle euclidien

2.4 Trigonométrie

2.5 Géométrie différentielle

2.6 Théorie des catastrophes

2.7 Objets fractals

2.8 Construction et géométrie

3 PLIAGE ET FORME DISCONTINUE

CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES ET CONSTRUCTIVES DES DOMAINES DEVELOPPABLES PLISSES

1 DEFORMATION DES SURFACES

2 PLIAGE GEODESIQUE RECTILIGNE

3 APPROCHE DE FORMES COURBES PAR PLIAGE

3.1 Domaines développables

3.2 Domaines convexes

3.3 Domaines à courbure totale négative

4 NIVEAUX D'ORGANISATION DES FORMES PLISSEES

4.1 Ordre local

4.2 Ordre moyen

4.3 Ordre global

5 REPERTOIRE DES ARCHETYPES DE CONFIGURATIONS PLIABLES

6 PROPRIETES DES CONFIGURATIONS PLISSEES MINIMA

6.1 Pliabilité

6.2 Repliabilité

6.3 Niveau de complexité

6.4 Degré de liberté

6.5 Anamorphose

6.6 Polymorphie

6.7 Configurations saturées

7 DU PLIAGE RECTILIGNE AU PLIAGE CURVILIGNE

8 DES SYSTEMES PLIES AUX INTERSECTIONS DE SURFACES

8.1 Plis, fentes et trous

9 PLIS ET RELATIONS GEOMETRIQUES A CARACTERE STRUCTURAL

9.1 Connexité

9.2 Orientation

9.3 Courbure

9.4 Dualité

9.5 Discontinuité

9.6 Intersection

9.7 Multidimensionalité

9.8 Mécanique

9.9 Géodésique

9.10 Répétitivité

ROLES STRUCTURANTS DU PLI

1 MECANIQUE

- 1.1 Aspect mécanique du comportement des structures
- 1.2 Conjugaison spatiale d'axes de rotation
- 1.3 Déplacements par conjugaison de rotations
- 1.4 Articulation des systèmes de plaques et de barres
- 1.5 Contrôle du mouvement et degré de liberté
- 1.6 Mouvement et transmission de forces

2 STATIQUE

- 2.1 L'essence relationnelle des structures
- 2.2 Paralysie des systèmes mécaniques
- 2.3 De l'isostaticité à l'hyperstaticité

3 INERTIE

- 3.1 Disposition de résistance de la matière
- 3.2 Travail de compression
- 3.3 Travail de flexion
- 3.4 Travail de cisaillement
- 3.5 Travail de torsion
- 3.6 Travail composite

4 REFEND

- 4.1 Stabilisation par spatialisation
- 4.2 Rigidification par cloisonnement

5 POLARITE

- 5.1 Singularité spatiale et comportement spécial
- 5.2 Caractérisation des fonctions constructives
- 5.3 Association du travail de surface et d'ossature

6 ANISOTROPIE

- 6.1 Dispositions spatiales orientées
- 6.2 Jeu directionnel des forces

7 MULTIDIRECTIONALITE

- 7.1 Distribution de directions de travail
- 7.2 Coordination de réseaux structurant le tridimensionnel

8 MULTIDIMENSIONALITE

- 8.1 Organisation des dimensions spatiales
- 8.2 Répartition hiérarchisée du travail
- 8.3 Collaboration structurale des dimensions spatiales

9 TRANSITIVITE

- 9.1 Intersection pliée formant joint unifiant
- 9.2 Ploiment et transition formelle consolidatrice
- 9.3 Pliage et procédure de mise en forme simplificatrice

10 PRECONTRAINTE

- 10.1 Impression du pli et accumulation d'énergie
- 10.2 Résistance par effet de précontrainte

11 IMBRICATION

- 11.1 Caractère structurant de la contenance
- 11.2 Orientation et reliefs d'imbrication spatiale

12 ACCUMULATION

- 12.1 Effet de massivité par repliage

13 ECHELLE

- 13.1 Variation de taille et modification structurale
- 13.2 Fourchette d'efficacité du pli
- 13.3 Quantité de plis et consolidation
- 13.4 Pliage, échelle et automorphie

14 SYNERGIE

- 14.1 Coopération d'effets s'impliquant mutuellement
- 14.2 Intervention d'autres effets structurants
- 14.3 Conjugaison des multiples niveaux de structuration

COMPOSITION STRUCTURALE

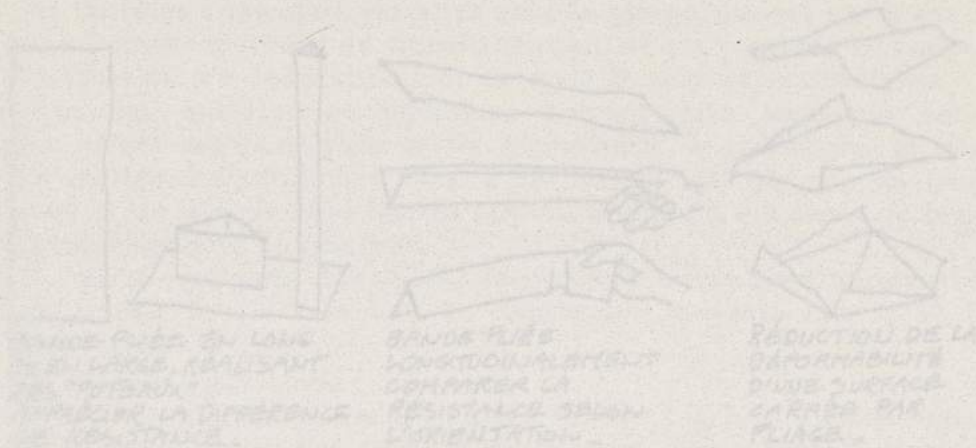
- 1 LES DETERMINANTS DE LA CONSTRUCTION
- 2 MATERIAUX ET MISE EN PLI
- 3 SYSTEMES STRUCTURAUX
- 4 VOIES DE PRODUCTION

PROPRETES CONNEXES DU PLI

- 1 FONCTIONS UTILITAIRES
- 2 SIGNIFICATION
- 3 EXPRESSION PLASTIQUE
- 4 DOMAINES D'APPLICATION
- 5 ROLES PEDAGOGIQUES
 - 5.1 Point de vue morphologique
 - 5.2 Point de vue structural
- 6 HISTORIQUE

CONCLUSION

Voici, par exemple, quelques modalités de résistance par la forme obtenues par pliage.



Le pli apparaît donc effectivement comme une réalité spatiale structurante. Il participe à l'obtention de performances optimales ce qu'il est, d'une certaine manière, une voie pour réduire le travail d'une épaisseur massive à un travail de surface, lui-même canalisé en des lignes agissantes, rejoignant par là l'optique structurale de Robert Le Ricolais, l'art d'organiser du vide avec deux fois rien...



En matière de structure, le pliage nous intéresse aussi par le fait qu'il est une modalité de déformation qui ne nécessite qu'une dépense d'énergie minimale ; c'est donc ce qui apparaît souvent avant un phénomène de rupture, dont la forme (pliée) est l'indice visible du processus physique. Et ces déformations s'accomplissent

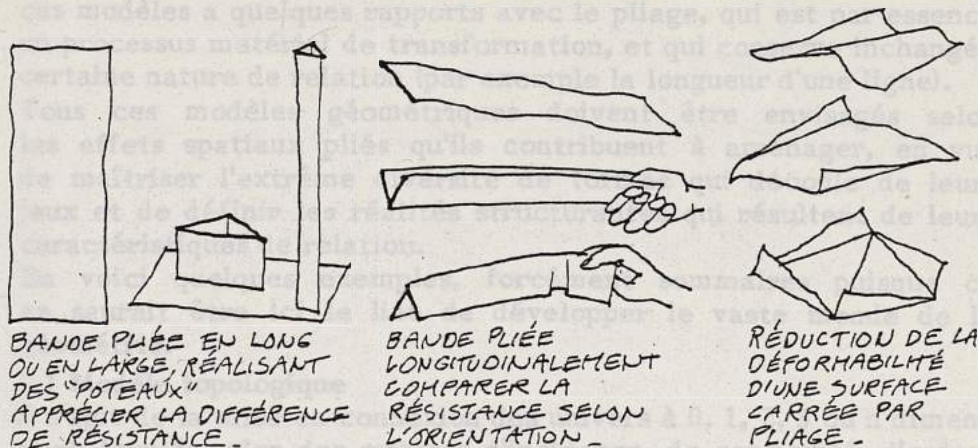
FORME PLIEE, DISPOSITION GEOMETRIQUE ET STRUCTURE

1 ORGANISATION SPATIALE ET CONSTRUCTIONS A RESISTANCE DE FORME

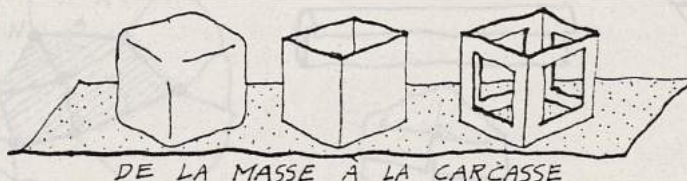
C'est la résistance par la forme, plutôt que par la quantité de matière mise en œuvre, ou bien l'effet de son exceptionnelle résistance qu'il nous intéresse de considérer ici, tant cette faculté contribue de manière prépondérante à l'efficacité structurale, et s'assortit conjointement des multiples capacités fonctionnelles et expressives de la forme, ce qui intéresse singulièrement l'architecte et bien d'autres catégories de concepteurs.

C'est en ce domaine la disposition spatiale, c'est-à-dire la nature des relations et la position des éléments dans un ensemble, qui s'avère structurellement déterminante, (et qui en dernière analyse régit aussi les propriétés mêmes des matériaux). Le terme même de "construction géométrique" est d'ailleurs à ce titre très révélateur. C'est en ce sens que le pliage en tant que processus de transformation et le pli en tant que disposition spatiale nous intéressent.

Voici, par exemple, quelques modalités de résistance par la forme obtenue par pliage.

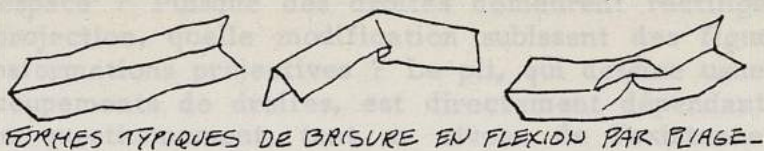


Le pli apparaît donc effectivement comme une réalité spatiale structurante. Il participe à l'obtention de performance optimale en ce qu'il est, d'une certaine manière, une voie pour réduire le travail d'une épaisseur massive à un travail de surface, lui-même canalisé en des lignes agissantes, rejoignant par là l'optique structurale de Robert Le Ricolais, l'art d'organiser du vide avec trois fois rien...



En matière de structure, le pliage nous intéresse aussi par le fait qu'il est une modalité de déformation qui ne nécessite qu'une dépense d'énergie minimale ; c'est donc ce qui apparaît souvent avant un phénomène de rupture, dont la forme (pliée) est l'indice visible du processus physique. Et ces déformations s'accomplissent

au respect de règles impérieuses de pliage qu'il importe donc de connaître pour les interpréter correctement.



FORMES TYPIQUES DE BRISURE EN FLEXION PAR PLIAGE-

Ces considérations induisent la nécessité préalable d'emprunter les diverses voies d'analyse de la spatialité pliée que considère la géométrie, et d'explorer l'univers des configurations qu'elle régit, en fonction de chaque modèle géométrique utilisable.

2 LE PLIAGE ET LES GEOMETRIES

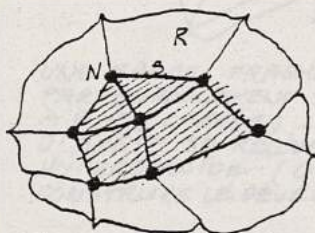
Un modèle géométrique consiste dans la prise en considération d'un ensemble de critères spatiaux (contiguïté, ordre, continuité, quantité, etc...) et dans le jeu cohérent de leurs effets envisagés au travers de transformations (opérations qui modifient divers paramètres en conservant quelques invariants - par exemple une projection de droites). Il existe plusieurs modèles géométriques, qui considèrent chacun certaines catégories de relations, relatifs à des systèmes particuliers d'organisation spatiale. Chacun de ces modèles a quelques rapports avec le pliage, qui est par essence un processus matériel de transformation, et qui conserve inchangée certaine nature de relation (par exemple la longueur d'une ligne).

Tous ces modèles géométriques doivent être envisagés selon les effets spatiaux pliés qu'ils contribuent à aménager, en vue de maîtriser l'extrême diversité de formes qui découle de leurs jeux et de définir les réalités structurantes qui résultent de leurs caractéristiques de relation.

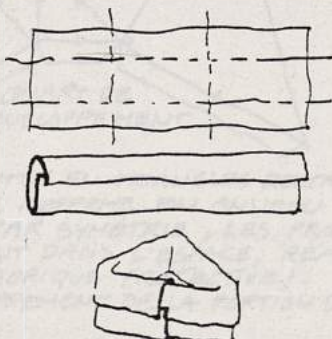
En voici quelques exemples, forcément sommaires puisque ce ne saurait être ici le lieu de développer le vaste monde de la géométrie.

2.1 Modèle topologique

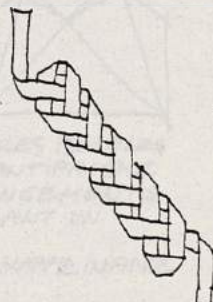
Il s'agit de la mise en connexion des univers à 0, 1, 2, 3 ou n dimensions étudiés selon des critères d'incidence, de contiguïté, d'ordre, de continuité, etc..., invariants, au travers de transformations continues telles qu'homéomorphisme, dualité, etc... (une espèce de "géométrie du caoutchouc" qui analyse ce qu'il y a de plus essentiel dans une configuration, ses caractéristiques de relation - ce qu'en de multiples acceptions on appelle aussi symptomatiquement "structure").



RÉSEAU EULERIEN PLIABLE
LE DOMAINE HACHURÉ EST
TEL QUE $N - S + R = 1$
• LES CONNEXIONS
STRUCTURENT LA FEUILLE
• NŒUDS À INCIDENCE
4 POUR LA PLIABILITÉ



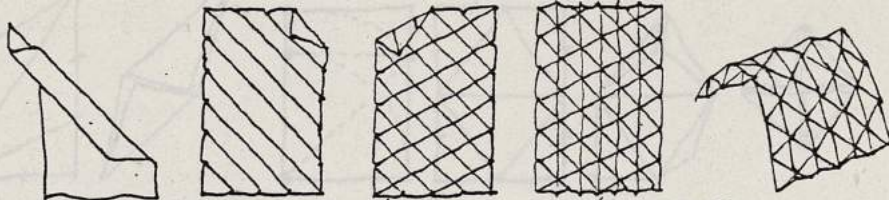
CYLINDRE PUIS TÔRE
À UN TROU OBTENUS
PAR DEUX COLLAGES.
À L'INVERSE, DEUX
COUPURES PRÉSERVENT
L'ENSEMBLE D'UN
SEUL TENANT = LES
TROUS SONT STRUCTURANTS.



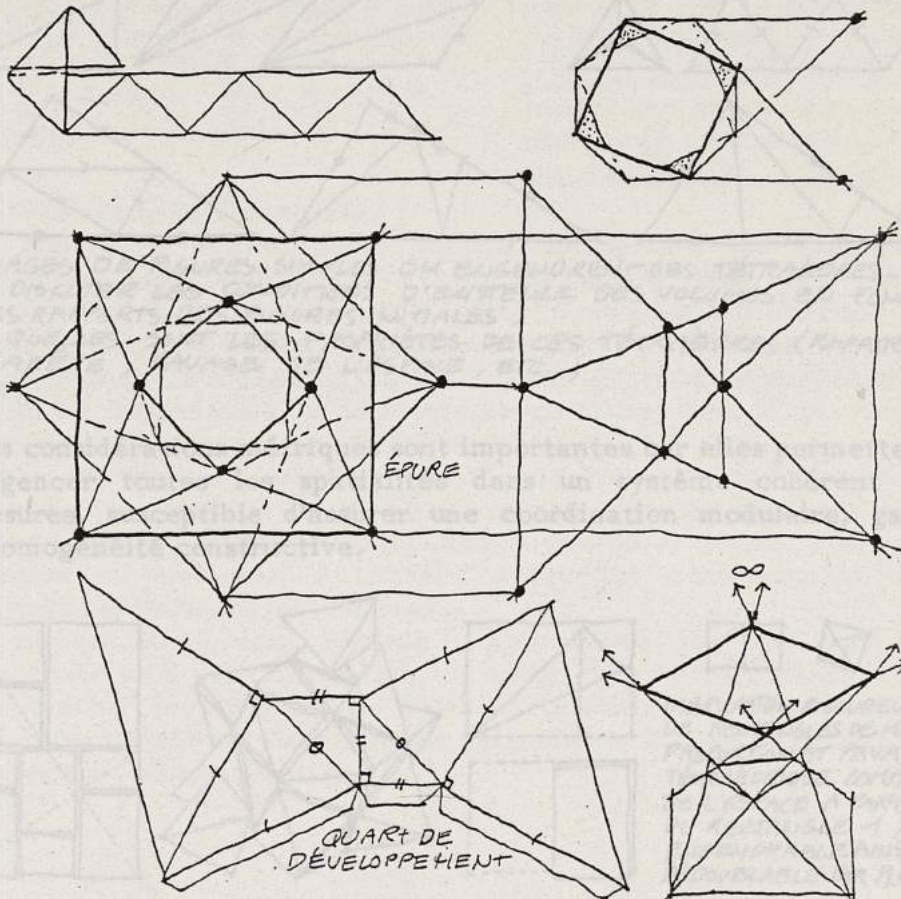
BANDE
SOLIDARISÉE PAR
ENLACEMENT
NODAL.

2.2 Modèle projectif

Comment des réseaux de lignes droites peuvent-ils se recouper dans l'espace ? Puisque des droites demeurent rectilignes lors d'une projection, quelle modification subissent des figures lors de transformations projectives ? Le pli, qui dessine usuellement des recouvrements de droites, est directement dépendant de ce type de questionnement, tant au niveau de l'existence même des configurations qu'au sujet de leurs intéressantes propriétés de repliabilité.



PAR DEUX ENROULEMENTS RÉGULIERS CONSÉCUTIFS PASSE
NÉCESSAIREMENT UN TROISIÈME QUI, PLIÉ EN SENS INVERSE,
ENGENDRE UNE CONFIGURATION DIVERSEMMENT REPLIABLE.



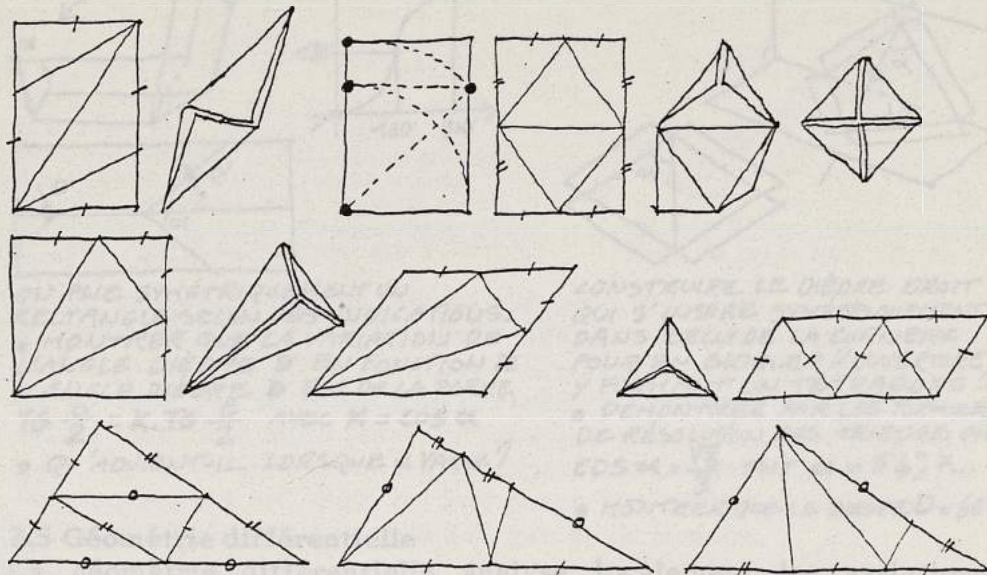
UNE BANDE, FRAGMENTÉE EN TRIANGLES RECTANGLES ISOCÈLES
PAR ENROULEMENT SE REFERME EN ANNEAU (ANTI-PRISME
À BASE CARRÉE) - PAR SYMÉTRIE, LES PROLONGEMENTS
D'ARÊTE SE RECOUPENT DANS L'ESPACE, RÉALISANT UN
HYPERBOÏDE (QUADRIQUE PROJECTIVE) -
CONSTRUIRE LE DÉVELOPPEMENT DE LA PORTION DE NAPPE INFINIE

2.3 Modèle euclidien

Des relations métriques conditionnent l'existence de certaines configurations. Les transformations de ces systèmes où s'analysent les modifications de proportion sont du ressort de la géométrie euclidienne (considérant les rapports de longueur, d'angle, de volume). Or, le pliage, par manipulation directe peut sans outil

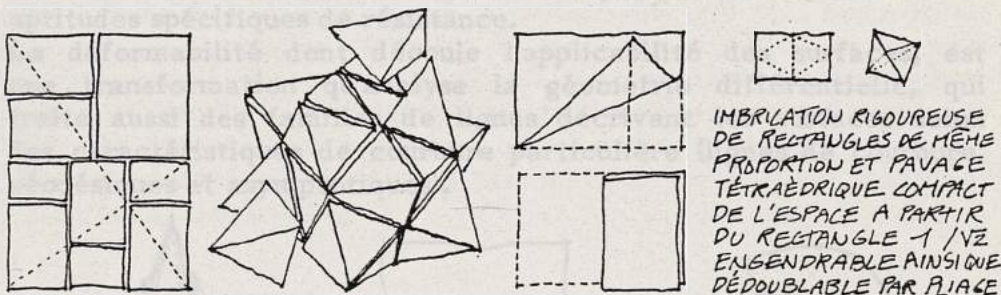
engendrer toute espèce de configuration plane ou spatiale. (On sait diviser une droite en divers rapports, tracer des bissectrices, des perpendiculaires etc...) Aussi le pliage possède-t-il la "puissance" de l'euclidien.

La structuration par pliage de certains corps éventuellement réguliers est donc du ressort de la géométrie euclidienne, comme la fabrication de ces caissons tétraédriques, constructions primordiales de l'espace s'il en est.



PLIAGES DE FIGURES SIMPLES QUI ENGENDRENT DES TÉTRAÈDRES -
 ● DISCUTER LES CONDITIONS D'EXISTENCE DES VOLUMES EN FONCTION DES RAPPORTS DES FIGURES INITIALES -
 ● QUELLES SONT LES PROPRIÉTÉS DE CES TÉTRAÈDRES (RAPPORTS D'ARÊTE, PAVAGE DE L'ESPACE, ETC...)

Ces considérations métriques sont importantes car elles permettent d'agencer toutes les spatialités dans un système cohérent de mesures, susceptible d'assurer une coordination modulaire, gage d'homogénéité constructive.



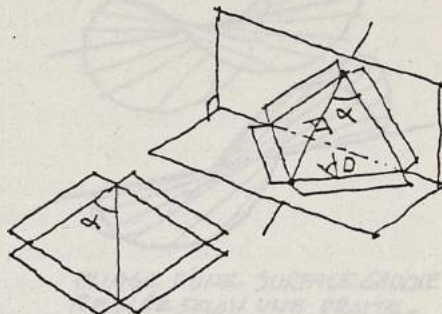
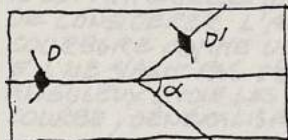
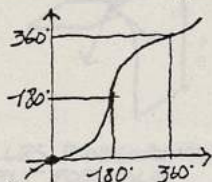
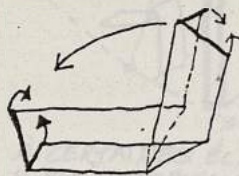
IMBRICATION RIGoureuse DE RECTANGLES DE MÊME PROPORTION ET PAVAGE TÉTRAÉDRIQUE COMPACT DE L'ESPACE A PARTIR DU RECTANGLE $1/\sqrt{2}$ ENGENDRABLE AINSI QUE DÉDOUBLABLE PAR PLIAGE

2.4 Trigonométrie

Les fonctions circulaires et les lignes trigonométriques établissent des corrélations entre des variations d'angle et de longueur qui autorisent la mesure des éléments du triangle (trigone/métrie). Le triangle est l'unité élémentaire par laquelle se construit toute spatialité et en particulier les dièdres, trièdres et "quadrièdres" qui apparaissent dans le pliage.

Les fonctions trigonométriques, qui sont régulièrement impliquées dans le déroulement des phénomènes périodiques importent aussi en matière de structure car l'effet des forces dépend essentiellement de leurs angles d'incidence.

Or, les aptitudes du pliage sont intrinsèquement dépendantes de rapports angulaires, et son action s'exerce précisément par rotations circulaires autour des charnières que forment les plis. Aussi, observe-t-on dans le pliage la mise en situation directe des éléments essentiels que traite la trigonométrie. Ceux-ci sont illustrés ici par deux aspects qui intéressent la construction : un mécanisme d'articulation et une fabrication d'objet astreint à des conditions de mesures angulaires.



ON PLIE SYMÉTRIQUEMENT UN RECTANGLE SELON CES INDICATIONS.

- MONTRER QUE LA VARIATION DE L'ANGLE DIÈDRE D' EN FONCTION DE L'ANGLE DIÈDRE D EST DE LA FORME $TG \frac{D'}{2} = K \cdot TG \frac{D}{2}$ AVEC $K = \cos \alpha$
- QU'ADVIENT-IL LORSQUE α VARIE ?

CONSTRUIRE LE DIÈDRE DROIT QUI S'INSÈRE SYMÉTRIQUEMENT DANS CELUI DE LA CORNIÈRE POUR EN BLOQUER L'OUVERTURE, Y FORMANT UN TÉTRAÈDRE -

- DEMONTRER PAR LES FORMULES DE RÉSOLUTION DES TRIÈDRES QUE $\cos \alpha = \frac{\sqrt{3}}{3}$ SOIT $\alpha = 54,7^\circ$, F...
- MONTRER QUE LE DIÈDRE $D = 60^\circ$

2.5 Géométrie différentielle

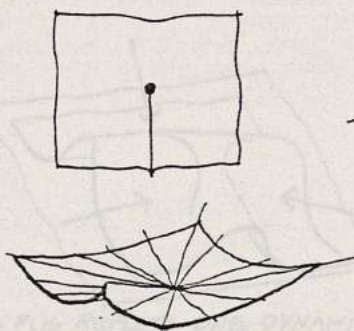
La géométrie différentielle analyse localement les variations métriques infinitésimales et continues autour d'un point. Par là se comprend la courbure, facteur d'organisation spatiale et de définition des formes important en physique, biologie et toute autre espèce de construction matérielle. Et puisque des champs de forces s'organisent en domaines de courbure, c'est là un critère essentiel de résistance par la forme.

Cette courbure est efficiente par sa nature et son intensité ; pour ce qui concerne les surfaces, quatre types de courbure sont à considérer - courbure nulle, simple courbure, double courbure (inverse ou convexe), à chacune desquelles correspondent des aptitudes spécifiques de résistance.

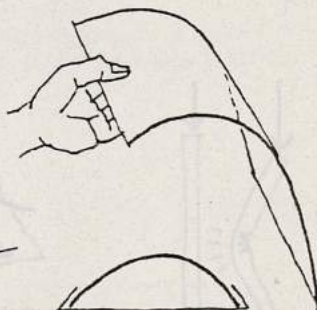
La déformabilité dont découle l'applicabilité des surfaces, est une transformation qu'analyse la géométrie différentielle, qui traite aussi des familles de lignes décrivant les surfaces selon des caractéristiques de courbure particulière (lignes de courbure, géodésiques et asymptotiques).



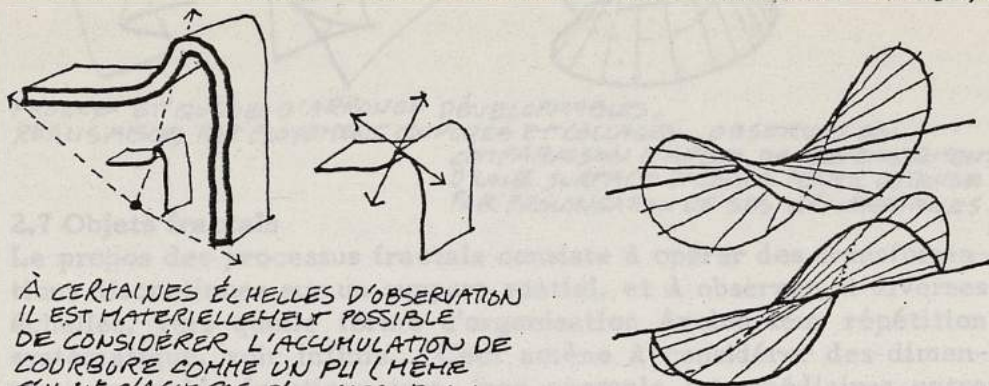
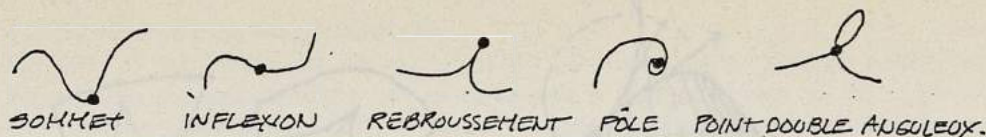
SURFACE DÉVELOPPABLE, DÉFORMABLE, APPLICABLE D'UNE INFINITÉ DE FAÇONS SUR UNE AUTRE. ELLE AUSSI DÉVELOPPABLE.



FAISCEAU DE DROITES ENGENDRÉ PAR PLOIEMENT ET PLIAGE D'UNE SURFACE DÉVELOPPABLE.



LA COURBURE COMME FACTEUR D'ACCOMMODATION ET DE RÉSISTANCE.



À CERTAINES ÉCHELLES D'OBSERVATION IL EST MATÉRIELLEMENT POSSIBLE DE CONSIDÉRER L'ACCUMULATION DE COURBURE COMME UN PLI (MÊME S'IL NE S'AGIT PAS D'UN VRAI POINT ANGULEUX - VOIR LES SINGULARITÉS D'UNE COURBE, GÉNÉRALISABLES AUX SURFACES.)

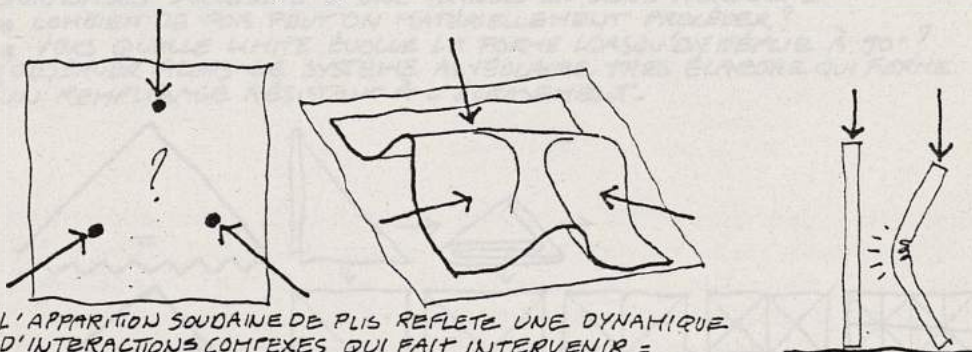
PLIAGE D'UNE SURFACE GAUCHE REGLÉE SELON UNE DROITE.

Il est manifeste que le pliage, qui trace des lignes d'articulation sur les surfaces et joue parfois de leur déformabilité (qu'au demeurant il explique) est intensément concerné par ces considérations. Et si c'est par le biais très particulier des surfaces à courbure totale constante nulle (ou développables) pliées selon leurs géodésiques (lignes droites) que va être exposée la majorité des propriétés structurales du pli, c'est en fait parce que celles-ci peuvent être transposées à tout autre type de ligne et de surface.

Outre ces registres très classiques de la géométrie, d'autres branches moins "usuelles" sont aussi concernées par le pliage, y compris des théories toutes récentes comme les deux exemples suivants.

2.6 Théorie des catastrophes

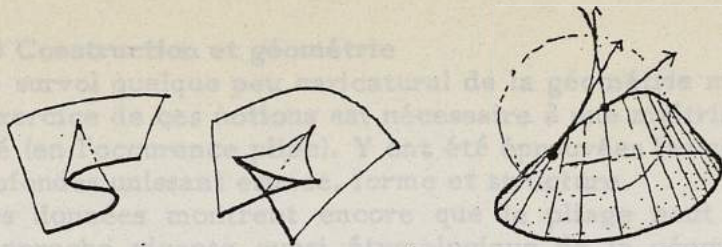
Cette théorie analyse les conditions d'apparition d'une singularité (ou discontinuité) lors du déroulement d'un processus d'interaction. Elle en considère la stabilité (c'est-à-dire le caractère "durable" ou "éphémère") et la morphologie (disposition spatiale). Cette dernière peut directement être le diagramme concret résultant des influences matérielles qui interviennent, soit plus conceptuellement une évolution dessinant le mode de variation de données exclusivement abstraites. Et le pli, qui des sept "catastrophes" possibles est la plus élémentaire, est directement concerné par chacune de ces deux acceptions. (On trouve encore les "fronces", "queues d'arronde" et autres formes que peut aussi modéliser matériellement le pliage).



L'APPARITION SOUDAINE DE PLIS REFLETE UNE DYNAMIQUE D'INTERACTIONS COMPLEXES QUI FAIT INTERVENIR =

- LES INTENSITÉS, ORIENTATIONS ET POINTS D'APPLICATION DES FORCES
- LA RÉSISTANCE DE LA FEUILLE
- LES LOIS DU PLIAGE CURVILIGNE

FLAMBAGE BRUSQUE D'UNE PIÈCE ÉLANCÉE -



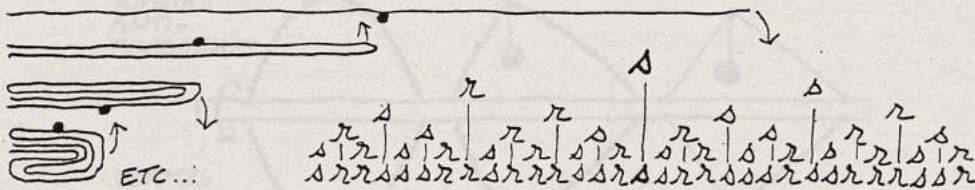
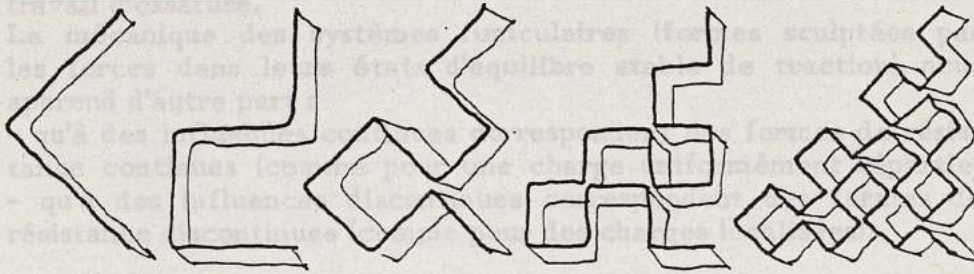
FRONCE ET QUEUE D'ARRONDE DÉVELOPPABLES, RÉALISABLES PAR PLOIEMENT, COUPURES ET COLLAGES - OBSERVER EN COMPARAISON L'ARÊTE DE REBROUSSEMENT D'UNE SURFACE D'ÉGALE PENTE OBTENUE PAR PROLONGATION DE SES GÉNÉRATRICES -

2.7 Objets fractals

Le propos des processus fractals consiste à opérer des transformations discontinues sur un support spatial, et à observer, à diverses échelles, vers quelle forme d'organisation évolue leur répétition systématique, voir infinie... Ceci amène à considérer des dimensions spatiales fractionnaires, (par exemple intermédiaires entre le bi et le tridimensionnel) selon la "densité" d'occupation spatiale qu'engendre la transformation. Cette notion théorique s'accorde assez heureusement avec les réalités matérielles lorsque l'on tente de remplir concrètement l'espace "tridimensionnel" avec des surfaces "bidimensionnelles" (chose théoriquement impossible puisqu'une surface n'a en principe aucune épaisseur).

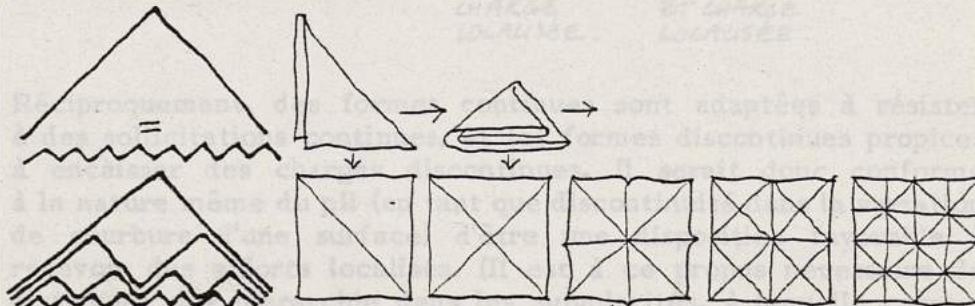
De telles notions sont opérationnelles dès lors que l'on est amené à répéter en quelque semblable situation une opération dont on a déjà éprouvé l'efficacité, comme dans les systèmes automorphiques (forme qui reproduit la même forme).

Ceci s'applique tout particulièrement au pliage, processus de transformation discontinue opérant sur des objets matériels.



SURPLIAGES SUCCESSIFS D'UNE BANDE EN SENS ALTERNÉ -

- COMBIEN DE FOIS PEUT ON MATÉRIELLEMENT PROCÉDER ?
- VERS QUELLE LIMITE ÉVOLUE LA FORME LORSQU'ON DÉPLIE À 90° ? (OBSERVER ALORS LE SYSTÈME ALVÉOLAIRE TRÈS ÉLABORÉ QUI FORME UN REMPLISSAGE RÉSISTANT À L'ÉCRASEMENT -



TÔLE ONDULÉE ÉGALE AU DIÈDRE INITIAL -

PLIAGE ET SURPLIAGES À EFFET RÉPÉTITIF - (RÉSEAU À HOMOTÉTIE INTERNE)

2.8 Construction et géométrie

Ce survol quelque peu caricatural de la géométrie montre combien l'exercice de ces notions est nécessaire à une maîtrise de la spatialité (en l'occurrence pliée). Y ont été éprouvées les correspondances profondes unissant espace, forme et structure.

Ces données montrent encore que le pliage peut être une voie d'approche vivante quasi étymologique de la géométrie, et aussi réciproquement, que c'est cette connaissance des géométries qui nous fait comprendre les règles de pliage, d'où découlent d'extrêmes richesses et subtilités de formes.

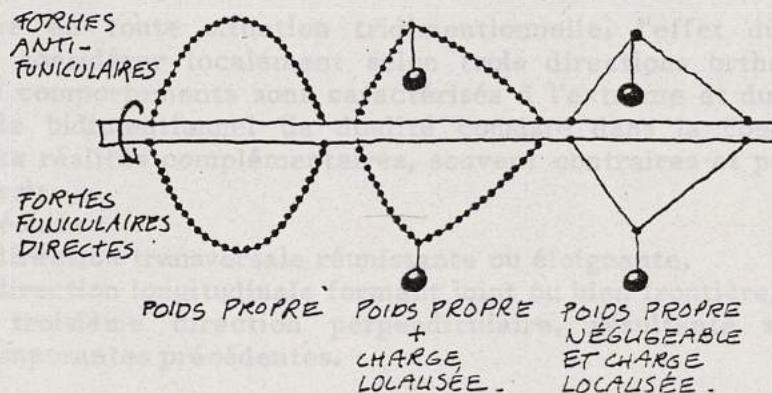
Les opérations sur l'espace nous intéressent encore dans leurs activités de mise en place, indispensable à la mise en œuvre d'un matériau pour fabriquer un objet : rappelons que l'on peut directement sans aucun outil autre que le support que l'on manipule, effectuer des superpositions, reporter des longueurs, effectuer des divisions, imprimer des tracés qui permettent de couper, faire des rabattements qui mettent en position, et jouer sans limite de cet autre rôle structurant de la géométrie qui correspond au sens déjà évoqué de "construction géométrique".

3 PLIAGE ET FORME DISCONTINUE

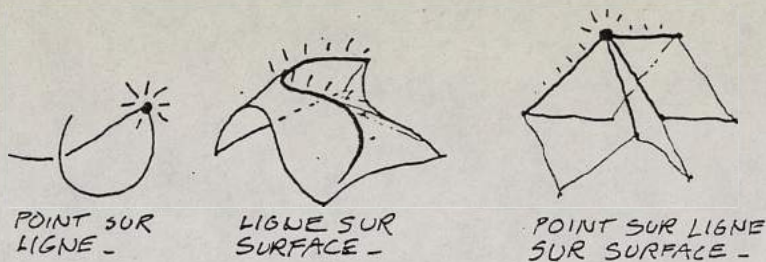
Il a, jusqu'à présent, pu être constaté cette ambivalence apparemment contradictoire du pliage, en un sens "discontinu" et dans un autre sens "continu" : il y a effectivement dans le pli une rupture nette de situation, mais cependant aussi une prolongation matérielle réelle, ce qui octroie aux objets plissés un comportement structural composite, alliant un travail de surface et un travail d'ossature.

La mécanique des systèmes funiculaires (formes sculptées par les forces dans leurs états d'équilibre stable de traction) nous apprend d'autre part :

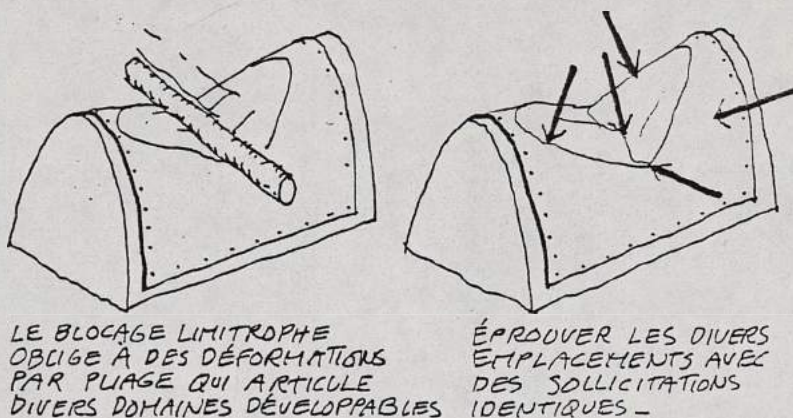
- qu'à des influences continues correspondent des formes de résistance continues (comme pour une charge uniformément répartie)
- qu'à des influences discontinues correspondent des formes de résistance discontinues (comme pour des charges localisées).



Réciproquement, des formes continues sont adaptées à résister à des sollicitations continues, et les formes discontinues propices à encaisser des charges discontinues. Il serait donc conforme à la nature même du pli (en tant que discontinuité dans la variation de courbure d'une surface) d'être une disposition favorable à recevoir des efforts localisés. (Il est à ce propos nécessaire de distinguer une hiérarchie dans les singularités, à laquelle correspond une gradation dans les comportements structuraux).



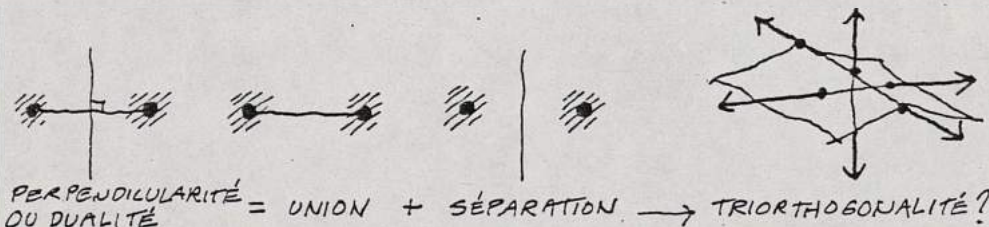
Corollairement toute apparition de discontinuité, même lorsqu'elle ne correspond pas directement à une sculpturation de type funiculaire, est aussi le siège de comportements particuliers, fréquemment comme résultat ainsi que comme cause. Ainsi, l'application progressive d'une force, quoique distribuée de manière relativement continue, va brusquement se résoudre aux emplacements critiques de conflit maximum par un pliage, variation soudaine d'accommodation pour la recherche d'un nouvel équilibre ; et cet endroit plissé, qui résulte d'une influence externe, va, d'une certaine manière, devenir un lieu de résistance particulière. (De tels effets se produisent par exemple régulièrement lorsqu'on contrarie les modalités normales de déformabilité d'une surface, en perturbant les règles d'applicabilité).



Comme en toute situation tridimensionnelle, l'effet du pliage est à considérer localement selon trois directions orthogonales où les comportements sont caractérisés à l'extrême et dualement dans le bidimensionnel (la dualité consiste dans la coexistence de deux réalités complémentaires, souvent contraires et perpendiculaires);

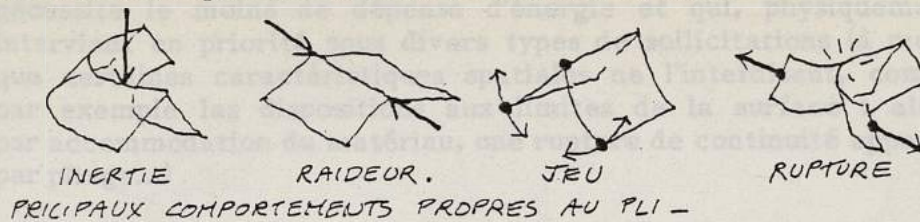
Il en résulte :

- . une direction transversale réunissante ou éloignante,
- . une direction longitudinale formant joint ou bien frontière,
- . une troisième direction perpendiculaire, résultante spatiale des composantes précédentes.



Ces effets directionnels se manifestent différemment selon les propriétés du matériau constituant le support. C'est cependant

de la conjugaison de ces comportements différenciés que découlent les caractéristiques structurales d'un système plissé.



CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES ET CONSTRUCTIVES DES DOMAINES DEVELOPPABLES PLISSES

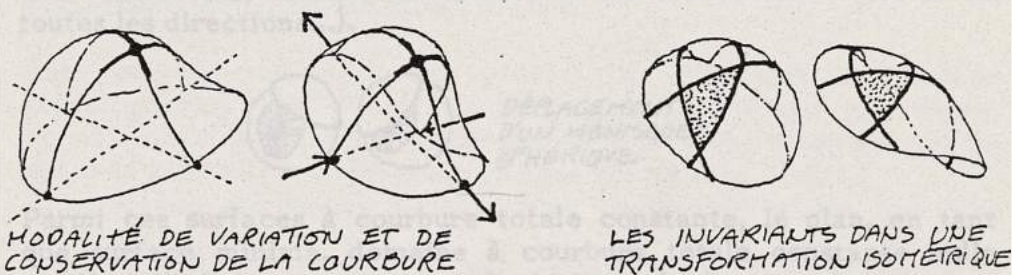
1 DEFORMATION DES SURFACES

Avant de s'intéresser aux propriétés structurales des systèmes plissés, il convient de considérer les conditions mêmes d'existence de telles configurations. Et dans la mesure où le pliage conjugue nécessairement les effets structurants propres au pli et ceux inhérents à la surface de support, il est nécessaire de préciser en quoi les diverses propriétés de surface conditionnent les possibilités de mise en pli (et réciproquement, comment ce sont ces mêmes propriétés de pliage qui permettent de comprendre les comportements de surface).

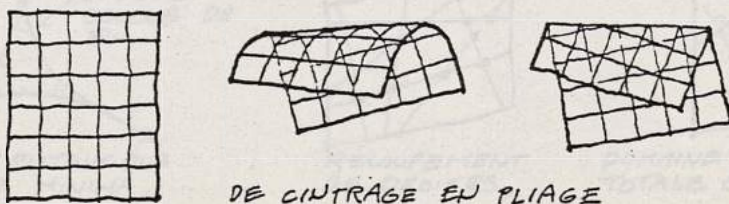
Toute surface se déforme par ploiement, de manière à ce que sa courbure totale demeure la même en chaque point (et plus précisément, selon le célèbre théorème de Gauss, de façon telle que toute courbure qui diminue en une direction augmente dans le sens perpendiculaire, de sorte que le produit des courbures demeure constant).

Cette mécanique de déformation est dite isométrique parce qu'elle conserve à la fois :

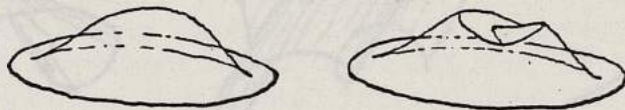
- la longueur des courbes sur les surfaces,
- l'angle qu'y font ces courbes entre elles,
- l'aire des surfaces qu'elles délimitent,
- la distribution des géodésiques.



Cette transformation est importante à comprendre parce qu'elle intervient dans les opérations de pliage d'une surface qu'il faut généralement ployer avant de plier, pliage qui constitue d'ailleurs l'état limite de ce type de déformation (Le froissage d'un papier réglé ne possède-t-il pas aussi les mêmes invariants ?)

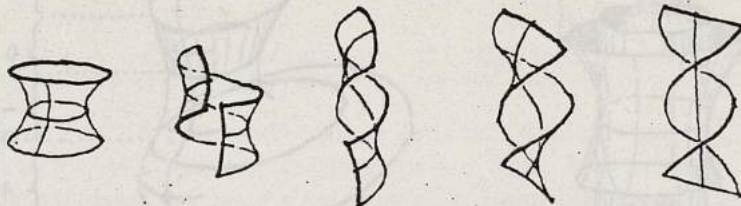


Cette modalité de déformation, parce qu'elle conserve le maximum de relations de l'étendue bidimensionnelle, est donc celle qui nécessite le moins de dépense d'énergie et qui, physiquement, intervient en priorité sous divers types de sollicitations (à moins que certaines caractéristiques spatiales ne l'interdisent, comme par exemple les dispositions aux limites de la surface : alors, par accommodation du matériau, une rupture de continuité apparaît par pliage...)



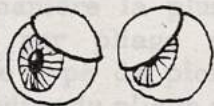
MÉNISQUE INDÉFORMABLE (DOMAINE LIMITÉ PAR UNE COURBE PLANE DONT LE PLAN EST TANGENT À LA SURFACE)
- NE PEUVENT APPARAÎTRE QUE DES BRISURES PAR PLIAGE.

A cette "métamorphose" isométrique s'associe, comme pour le pliage, tout un registre de formes associées aux propriétés voisines (Ainsi le passage des surfaces de révolution aux hélicoïdes, comme cette transmutation de caténoïde en hélicoïde minimum).



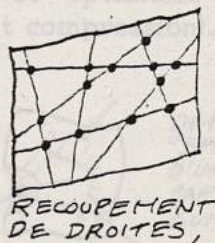
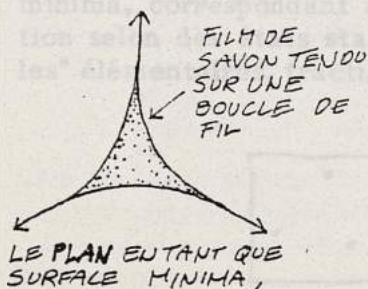
ISOMÉTRIE TRANSFORMANT LES LIGNES DE COURBURE EN LIGNES ASYMPTOTIQUES ET LES LIGNES ASYMPTOTIQUES EN LIGNES DE COURBURE (LE PASSAGE DU PLUS COURBE AU MOINS COURBE INDUISANT LE PASSAGE DU MOINS COURBE AU PLUS COURBE ET RÉCIPROQUEMENT)

Parmi l'univers infini des surfaces, le registre des surfaces à courbure totale constante (c'est-à-dire de signe et de valeur identique en chaque point) possède des propriétés de déplacement sur soi-même remarquables, ce qui en induit l'usage très fréquent (chaque fois qu'au long de l'étendue doit s'exercer la permanence d'un même rôle, comme la rotation de l'œil dans son orbite selon toutes les directions...).

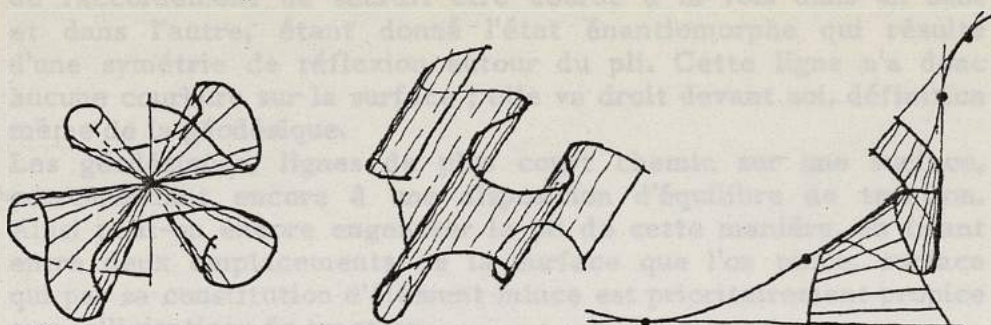


DÉPLACEMENT D'UN MÉNISQUE SPHÉRIQUE

Parmi ces surfaces à courbure totale constante, le plan, en tant que surface minima, domaine à courbure totale constante nulle et siège d'infinis recouvrements de droites, s'avère des plus conceptuellement accessible et très familier parce que communément produit selon maintes techniques et matériaux.



On en obtient par déformation isométrique les surfaces développables (c'est-à-dire applicable en toutes positions sur un plan sans déchirure, ni duplication).



CÔNE, CYLINDRE ET TANGENTALE REPRÉSENTANT LES TROIS TYPES DE SURFACES REGLÉES DÉVELOPPABLES ENGENDRABLES PAR DÉFORMATION DU PLAN.

Ces nappes développables constituent des transitions entre les domaines convexes et gauches.



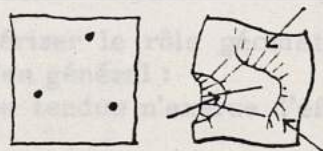
TRANSITIONS DÉVELOPPABLES ENTRE DOMAINES COURBES

Aussi est-ce pour de telles étendues développables dont les propriétés élémentaires sont transposables aux autres types de courbure que les règles de pliage vont être détaillées. (Le pliage de telles surfaces est en l'occurrence d'autant plus intéressant qu'il octroie une tenue appréciable aux moins structurées des étendues, étant donné leur quasi inexistence de courbure).

2 PLIAGE GEODESIQUE RECTILIGNE

Bien que la manière la plus générale de déformer une surface (développable) par pliage s'accomplisse par pliage curviligne, en associant le type de ploiement déjà évoqué, c'est d'abord le cas très particulier du pliage rectiligne qui va être étudié :

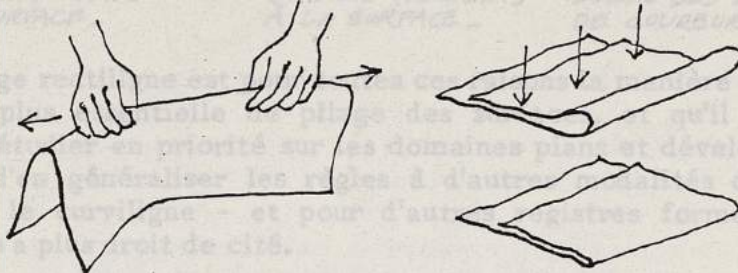
- parce que ses règles simples sont transposables aux cas plus complexes,
- parce qu'il correspond à une pratique usuelle étant donné sa facilité de réalisation,
- parce qu'il correspond à une efficacité structurale exceptionnelle, celle des configurations géodésiques. (Systèmes de "trajectoires" minima, correspondant à des modalités naturelles d'autostructuration selon des états stables et "optimisés" de contraintes "normales" élémentaires, traction et compression).



DÉFORMATION "SPONTANÉE" D'UNE SURFACE PAR PLIAGE CURVILIGNE

En effet, le pliage est usuellement engendré par rabattement en appliquant une nappe de la surface sur l'autre. Alors la ligne de raccordement ne saurait être courbe à la fois dans un sens et dans l'autre, étant donné l'état énantiomorphe qui résulte d'une symétrie de réflexion autour du pli. Cette ligne n'a donc aucune courbure sur la surface ; elle va droit devant soi, définition même de la géodésique.

Les géodésiques, lignes de plus court chemin sur une surface, correspondent encore à une disposition d'équilibre de traction. Ainsi peut-on encore engendrer le pli de cette manière, en tirant entre deux emplacements de la surface que l'on pince, surface qui par sa constitution d'élément mince est prioritairement propice aux sollicitations de traction.



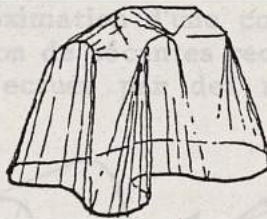
PLIAGE GÉODÉSIQUE OBTENU À LA MAIN PAR ÉTIREMENT

PLI GÉODÉSIQUE RECTILIGNE OBTENU PAR APPLICABILITÉ.

Ces droites que l'on engendre ainsi sont des lignes simples, usuelles, dont la distribution géométrique nous est donc familière et accessible. Elles existent en tout domaine développable dont elles constituent d'ailleurs la caractéristique essentielle (par tout point d'une surface développable passe une ligne droite au long de laquelle s'applique le plan tangent à la surface en ce point).

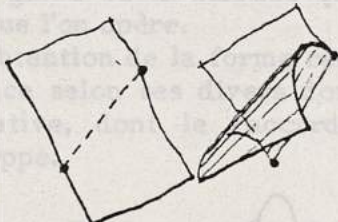


INVARIANCE DU PLAN TANGENT AU LONG D'UNE GÉNÉRATRICE RECTILIGNE -

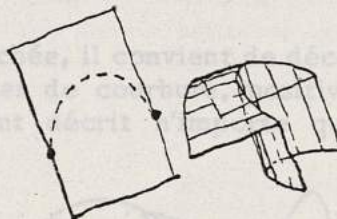


DÉFORMATION D'UNE FEUILLE CIRCULAIRE PLANE PAR LE RACCORDEMENT DE NAPPE DÉVELOPPABLES -

Ces droites selon lesquelles on plie la surface (éventuellement non développable) y cumulent encore les propriétés structurantes des lignes de courbure et des lignes asymptotiques, auxquelles elles sont alors confondues.



PLIAGE RECTILIGNE AVEC APPLICABILITÉ LOCALE

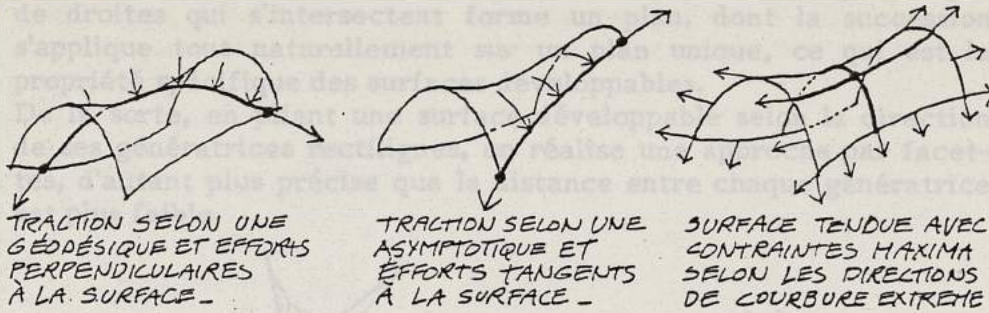


PLIAGE CURVILIGNE SANS APPLICABILITÉ

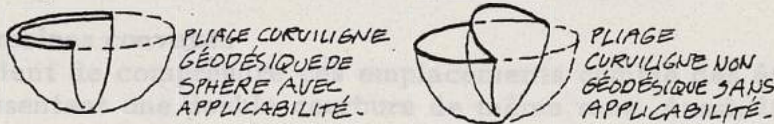
Afin de caractériser le rôle géométrico-structural de ces lignes mentionnons qu'en général :

- une géodésique tendue n'exerce d'effort que perpendiculairement à la surface.

- Une asymptotique tendue n'exerce d'effort que tangentiellement à la surface - (d'où équilibre aux limites)
- Dans une membrane tendue, les contraintes en chaque point sont maximum et minimum selon les deux directions perpendiculaires des lignes de courbure.



Le pliage rectiligne est pour toutes ces raisons la manière "naturelle" la plus essentielle de pliage des surfaces, et qu'il convient donc d'étudier en priorité sur les domaines plans et développables, avant d'en généraliser les règles à d'autres modalités de pliage - dont le curviligne - et pour d'autres registres formels où la droite n'a plus droit de cité.



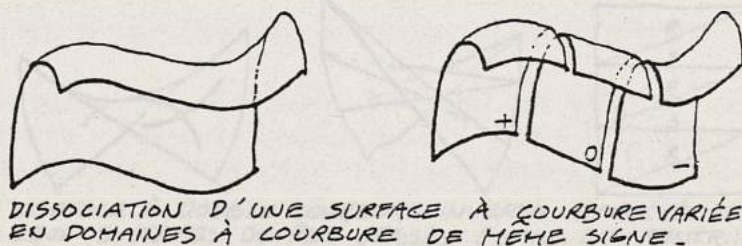
3 APPROCHE DES FORMES COURBES PAR PLIAGE

De la même manière que l'approximation d'une courbe continue peut se réaliser par une succession de sécantes rectilignes, celle d'une surface courbe peut s'effectuer par des raccordements de plans.



Une telle approche des formes peut être faite par pliage continu d'une surface plane, avec plusieurs niveaux de précision, en fonction du galbe de la surface que l'on veut obtenir, et du type de pliage que l'on opère.

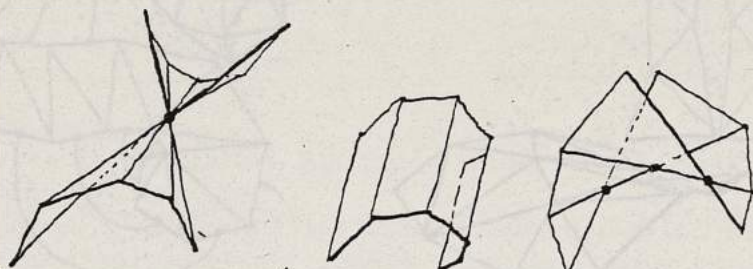
Pour l'obtention de la forme recherchée, il convient de décomposer la surface selon ses divers domaines de courbure, positive, nulle ou négative, dont le raccordement décrit n'importe quel type d'enveloppe.



3.1 Domaines développables

C'est pour ces emplacements à courbure totale nulle que l'approximation par pliage est la plus "fine". Puisqu'une surface développable est constituée d'une succession de droites qui se coupent (en un point, au long d'une courbe ou à l'infini), chaque couple de droites qui s'intersectent forme un plan, dont la succession s'applique tout naturellement sur un plan unique, ce qui est la propriété spécifique des surfaces développables.

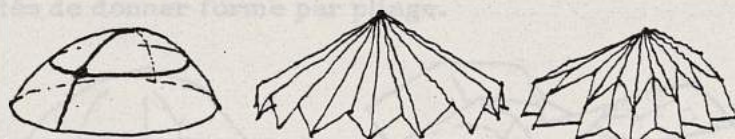
De la sorte, en pliant une surface développable selon la direction de ses génératrices rectilignes, on réalise une approche par facettes, d'autant plus précise que la distance entre chaque génératrice est plus faible.



SURFACES POLYÉDRIQUES APPROCHANT RESPECTIVEMENT UN CÔNE, UN CYLINDRE ET UN HÉLICOÏDE -

3.2 Domaines convexes

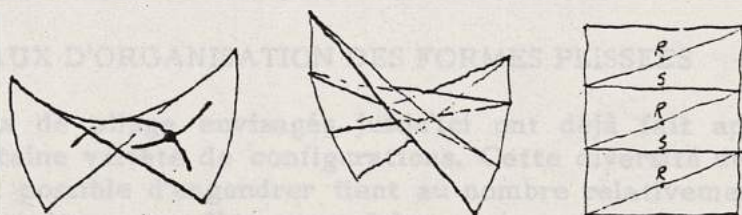
Il convient de comprendre ces emplacements comme des étendues qui présentent une double courbure de même sens. Aussi, la façon de procéder consiste à effectuer d'abord un premier pliage qui constitue une approche primaire du domaine considéré, puis d'effectuer un système de pli secondaire selon la deuxième direction de courbure.



AUX DEUX DIRECTIONS PRINCIPALES DE COURBURE (PARALLÈLES ET MÉRIDIDIENS) CORRESPONDENT DEUX SYSTÈMES DE PLS, ICI RADIAUX ET CONCENTRIQUES -

3.3 Domaines à courbure totale négative

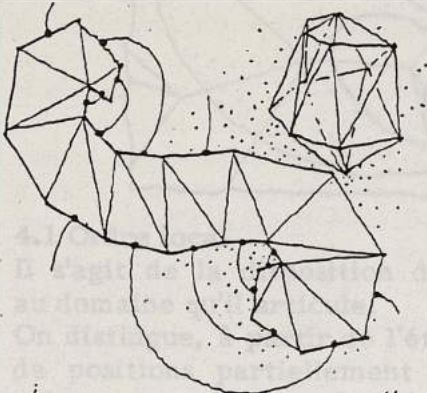
Il convient de comprendre les surfaces gauches comme des étendues qui présentent une double courbure inverse. Aussi, un premier système de plis saillants, recoupé par un second système de plis rentrants réalise l'approximation d'une surface gauche réglée; (on réalise en fait le gauchissement d'une succession de quadrilatères que l'on plie selon leur diagonale). De cette manière n'importe quel zig zag de plis rejoignant deux courbes quelconques convient. Les autres types de surfaces à courbure totale négative non réglée sont d'autant mieux approchés que l'on choisit la direction de leurs lignes asymptotiques, (c'est-à-dire les moins courbes) comme référence pour effectuer le pliage.



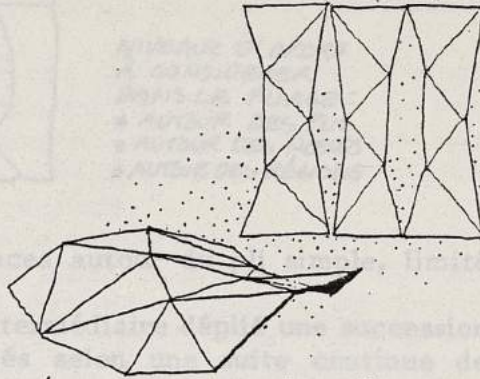
SURFACE À DOUBLE COURBURE INVERSE APPROCHÉE PAR DEUX SYSTÈMES DE PLS OPPOSÉS (SAILL. ET RENTR.)

Pour chacun de ces deux derniers types de domaine convexe ou gauche, il existe bien sûr la possibilité d'effectuer le pliage des "laizes" de surface qui constituent le développement approché de la surface.

On observe dans le premier cas que tous les plis sont dans le même sens (double courbure synclastique). Dans l'autre cas les plis sont inversés, les saillants alternant avec les rentrants (double courbure anticlastique).

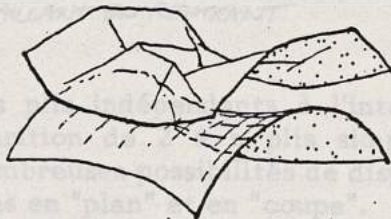
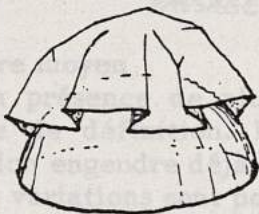


"ÉPLUCHURE" DE "PATATOÏDE"
CONVEXE À VINGT FACES -



DÉVELOPPEMENT DE "SCHIP" GAUCHE
À QUINZE FACES -

On peut enfin procéder empiriquement en faisant matériellement épouser le plus intimement possible la nappe de surface développable sur le support gauche ou convexe considéré. Cette dernière façon de procéder témoigne que l'inaapplicabilité est génératrice de plis, que l'on peut orchestrer d'une infinité de manières, ordonnées ou désordonnées, et qu'il n'existe en fait pas de limite aux possibilités de donner forme par pliage.



EN RAISON DE L'INAPPLICABILITÉ DU DÉVELOPPABLE, LES
PLIS SONT "PÉRIPHÉRIQUES" POUR LE QUASI-CONVÈXE ;
ILS SONT "CENTRAUX" POUR LE QUASI-GAUCHE -

L'approximation d'une surface peut enfin s'accomplir selon plusieurs niveaux de précision en fonction du type de pliage considéré, plis simples ou composés, que ce qui suit va caractériser.

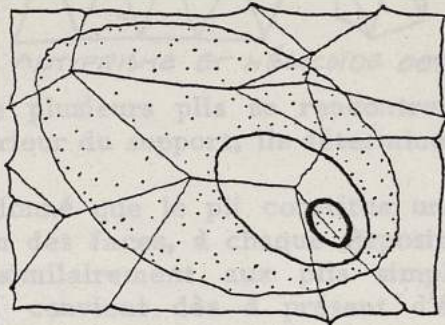


CYLINDRE À APPROXIMATION "OSCULATRICE", "FRACTALE", "COMPLEXE", ETC...

4 NIVEAUX D'ORGANISATION DES FORMES PLISSEES

Les jeux de pliage envisagés jusqu'ici ont déjà fait apparaître une certaine variété de configurations. Cette diversité de formes qu'il est possible d'engendrer tient au nombre relativement élevé des paramètres que l'on peut faire varier et combiner, depuis un niveau d'ordre local jusqu'à un niveau d'ordre de plus en plus

général. Une telle distinction devrait permettre de considérer des effets structurants à divers niveaux d'organisation. D'un simple point de vue géométrique, il convient, selon un ordre croissant de complexité, de discerner un ordre local, moyen, et global.



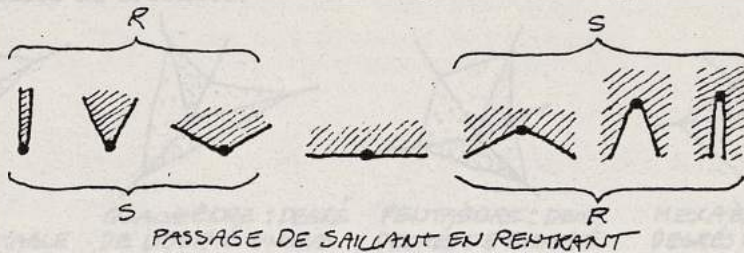
NIVEAUX D'ORDRE
À CONSIDÉRER
DANS LE PLIAGE :-
• AUTOUR DES PLS
• AUTOUR DES NŒUDS
• AUTOUR DES RÉGIONS

4.1 Ordre local

Il s'agit de la disposition des faces autour du pli simple, limité au domaine qu'il articule.

On distingue, à partir de l'état intermédiaire déplié une succession de positions partiellement repliés selon une suite continue de valeurs angulaires, jusqu'aux situations extrêmes totalement repliées.

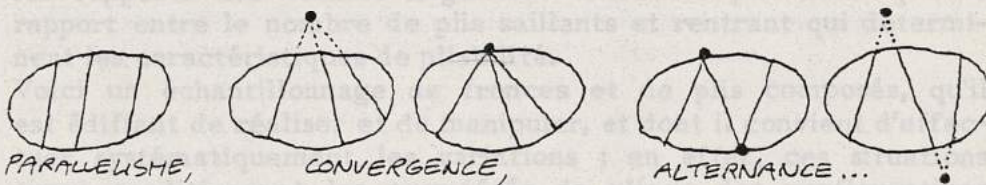
L'orientation du dièdre formé par les faces adjacentes du pli permet d'établir la distinction entre pli saillant et pli rentrant.



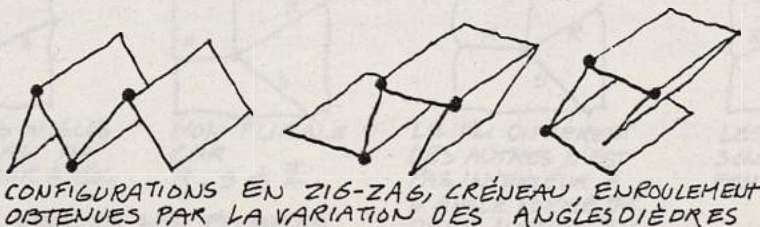
4.2 Ordre moyen

C'est la présence de plusieurs plis indépendants à l'intérieur du domaine de définition. L'apparition de 2 à n plis simples dans une région engendre déjà de nombreuses possibilités de dispositions, dont les variations sont possibles en "plan" et en "coupe".

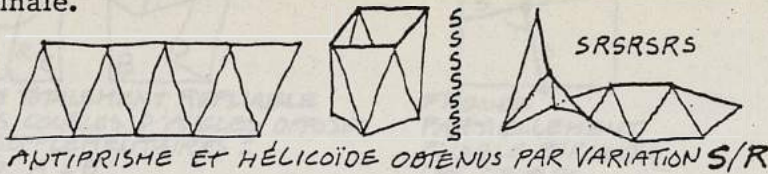
Il s'agit en plan des modalités de recouvrement des plis, à l'extérieur, ou bien ce qui revient au même, sur la limite du support. Intervient aussi la distance entre ces plis.



Il s'agit en coupe des variations de valeurs des angles dièdres, qui influent encore sur les jeux de saillant/retrant.



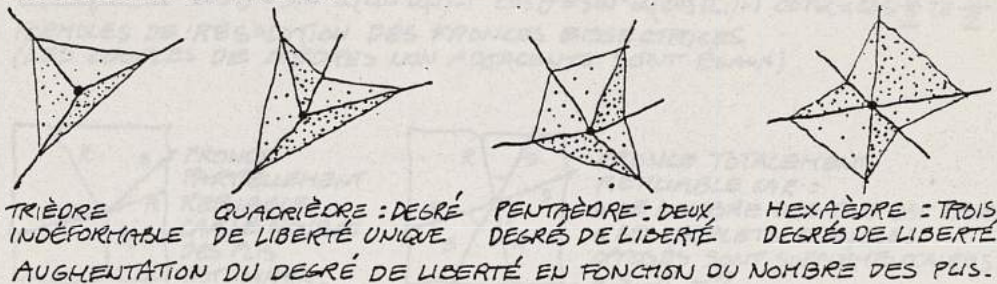
A ce niveau élémentaire, quelques variations sur une simple bande montrent combien celles-ci influencent radicalement la forme finale.



Lorsque plusieurs plis se rencontrent en un point unique situé à l'intérieur du support, ils déterminent un système de plis composés.

Etant donné que le pli constitue une charnière qui articule une rotation des faces, à chaque disposition de plis composés correspond, similairement aux plis simples, un système mécanique dont il convient dès à présent d'évoquer quelques propriétés, qui seront d'avantage développées plus loin.

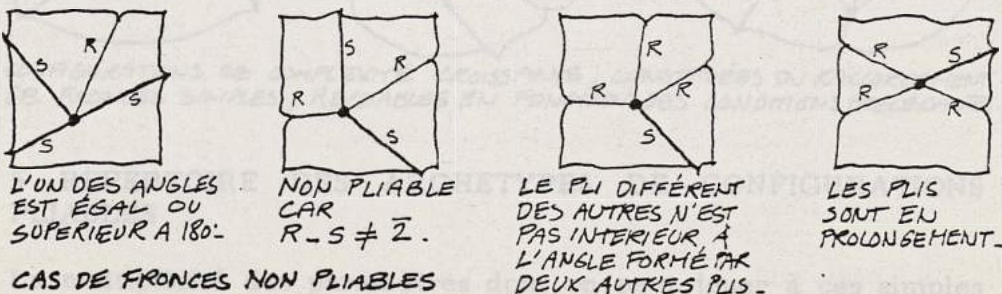
Toute disposition de plis composés se comporte comme le polygone articulé que détermine la section plane du système (en coupant chaque pli). Selon les règles de la statique, un trièdre (que formerait un système de trois plis) est indéformable. Quatre plis déterminent un quadrièdre, qui possède un degré de liberté unique, c'est-à-dire que le blocage de l'un des dièdres paralyse l'ensemble. Par suite les configurations à 5, 6, n plis autour du "nœud" présentent respectivement 2, 3, n-3 degrés de liberté, ce qui caractérise leur faculté de mobilité.

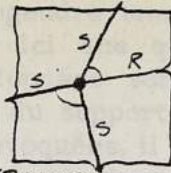
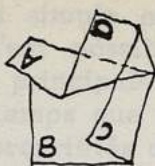
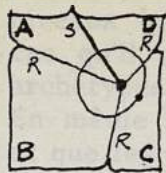


Sans approfondir ces règles, très vite complexes, observons que le degré de liberté global d'un système constitué de plusieurs plis composés, et possédant donc plusieurs sommets, est fonction de la somme des degrés de liberté locaux.

Il faut donc quatre plis, articulant quatre faces pour assurer la pliabilité (De tels systèmes seront appelés "fronces"). Ce sont les rapports des valeurs angulaires entre les plis ainsi que le rapport entre le nombre de plis saillants et rentrant qui déterminent les caractéristiques de pliabilité.

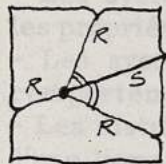
Voici un échantillonnage de fronces et de plis composés, qu'il est édifiant de réaliser et de manipuler, et dont il convient d'effectuer systématiquement les variations ; en effet, ces situations types conditionnent les propriétés de pliage des configurations plus complexes.



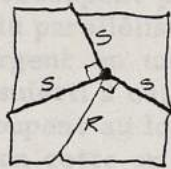


FRONCE TOTALEMENT REPLIABLE
 CAR LES COUPLES D'ANGLES OPPOSÉS
 SONT SUPPLÉMENTAIRES =
 $C = D - A + B$
 $C + A = D + B$
 $A + B + C + D = 360^\circ$
 $C + A = B + D = 180^\circ$ G.Q.F.D.

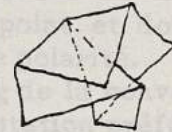
**FRONCE PARTIELLEMENT
 PLIABLE** PARCE QUE
 LES COUPLES
 D'ANGLES OPPOSÉS
 NE SONT PAS
 SUPPLÉMENTAIRES.



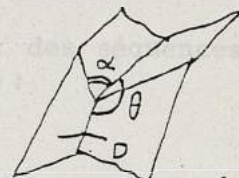
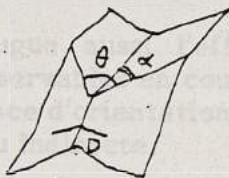
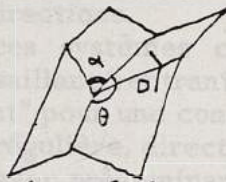
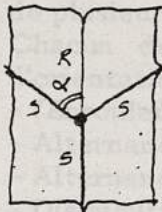
**FRONCE
 BISSECTRICE**



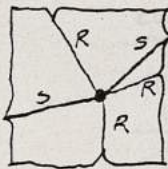
FRONCE RECTANGLE



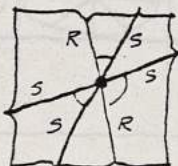
CAS PARTICULIERS ET USUELS DE FRONCES REPLIABLES SYMÉTRIQUES



$\cos \theta = \sin^2 \alpha (\cos D + 1) - 1$ $\cos \theta = \sin^2 \alpha (\cos D - 1) + 1$ $\cot \alpha = \cos \frac{\theta}{2} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}$
FORMULES DE RÉSOLUTION DES FRONCES BISSECTRICES
 (LES COUPLES DE DIÈDRES NON ADJACENTS SONT ÉGAUX)



**FRONCE
 PARTIELLEMENT
 REPLIABLE**
 CAR LE NOMBRE
 DES PLIS
 EST IMPAIR.



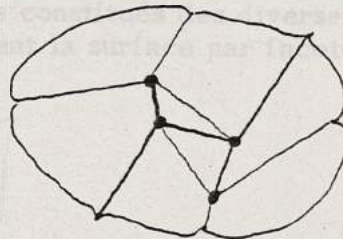
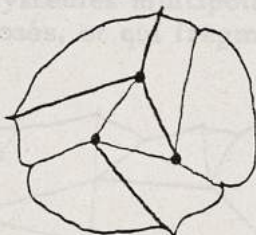
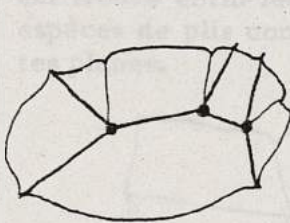
**FRONCE TOTALEMENT
 REPLIABLE** CAR =
 • LE NOMBRE DES PLIS EST PAIR.
 • LES TRIPLETS D'ANGLES
 OPPOSÉS SONT SUPPLÉMENTAIRES.
 • $S - R = 2$.

EXTENSIONS (EN IMAGINER D'AUTRES...)

4.3 Ordre global

Lorsque plusieurs sommets sont situés à l'intérieur du domaine de définition on peut distinguer, dans un ordre de complexité croissant :

- Des chaînes qui ne déterminent aucune région qui soit totalement délimitée par un circuit de plis.
- Des réseaux tels qu'une, deux ou bien n régions polygonales soient totalement délimitées par des circuits de plis.



CONFIGURATIONS DE COMPLEXITÉ CROISSANTE, CONSTITUÉES DU RACCORDEMENT DE FRONCES SIMPLES, REPLIABLES EN FONCTION DES CONDITIONS PRÉLÉGANES.

5 REPERTOIRE DES ARCHETYPES DE CONFIGURATIONS PLIABLES

La multiplicité des paramètres dont on peut jouer à ces simples

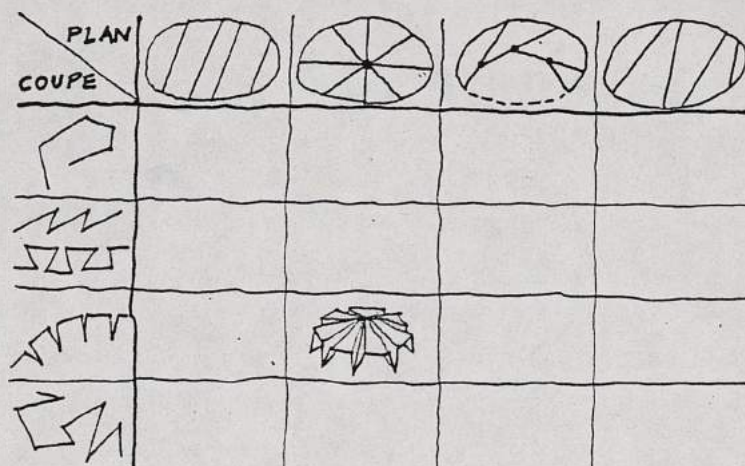
niveaux (pli simple et composé) engendre une telle quantité de cas qu'il n'est possible d'envisager ici que quelques catégories archétypes, principalement celles fondées sur l'ordre répétitif. En même temps que les propriétés du support (ici développable) et que les propriétés de pliage pré-évoquées, il faut aussi considérer les propriétés générales des configurations. On observe alors les effets des principes universels de composition qui orchestrent toute spatialité : ordre, désordre, répétitivité, diversité, proportion, densité, directionnalité, etc...

On est amené à établir les grandes classes de configurations suivantes :

- Les systèmes dont les plis ne se recoupent pas et qui unissent les propriétés de l'unidirectionnel et du parallélisme.
- Les systèmes dont les plis convergent en un point et dont le comportement est essentiellement assujéti à cette polarité.
- Les distributions de plis qui se recoupent au long de la convexité d'une ligne, et qui "fonctionnent" selon cette orientation préférentielle.
- Les jeux de plis alternés qui additionnent les effets simultanés de plusieurs directions.

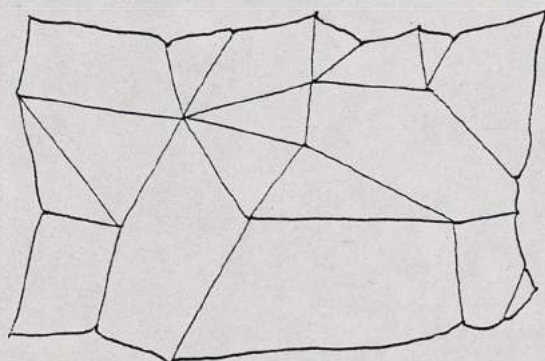
Chacun de ces systèmes conjugue aussi l'effet des séquences d'orientation saillant/reentrant observables en coupe :

- "Enroulement" pour une constance d'orientation,
- Alternance régulière, directe ou indirecte,
- Alternance avec prédominance,
- Distribution aléatoire.



PRINCIPALES CATEGORIES DE CONFIGURATIONS ELEMENTAIRES
ENGENDRABLES PAR CONJUGAISON DES DIVERS TYPES D'ORDRE-

On trouve enfin les systèmes multipolaires constitués des diverses espèces de plis composés, et qui fragmentent la surface par facettes planes.



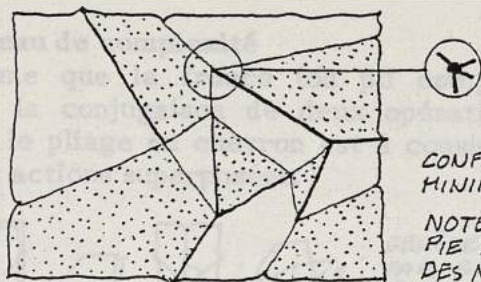
CONFIGURATION
PLIABLE
MAIS
NON REPLIABLE-

6 PROPRIETES DES CONFIGURATIONS PLISSEES MINIMA

Bien que cet inventaire taxinomique soit fort grossier, il n'existe pas de configuration plissée qui ne corresponde à l'une quelconque des catégories évoquées.

Si le répertoire des formes pliables possibles dans ce premier cas ne connaît guère de restriction, il est relativement contingenté dans le cas des conjugaisons de plis composés, où la disposition globale doit respecter une somme de conditions locales extrêmement astreignantes.

Ceci est particulièrement sensible dans le cas des configurations pliables minima, qui ne sont composées que de quatre plis autour de chaque "nœud".



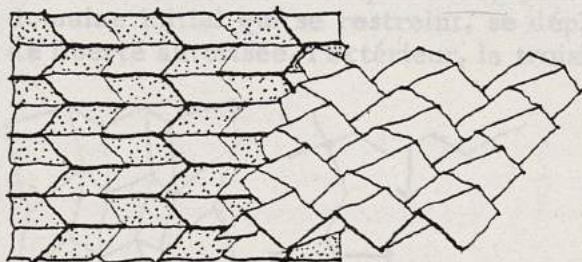
CONFIGURATION PLISSÉE MINIMA -

NOTER LE CHROMATISME PIE LIÉ AU DEGRÉ PAIR DES NŒUDS À INCIDENCE 4

De tels systèmes justifient davantage de développements : ce sont des configurations qui, parce qu'elles présentent le nombre minimum de plis nécessaires à l'articulation d'un mouvement, sont celles qui apparaissent "spontanément" lors de l'accommodation d'une surface à quelque perturbation, ne "dépensant" qu'un minimum d'énergie pour leur mise en forme. Elles présentent des caractéristiques de pliabilité élémentaires, utiles à la compréhension des systèmes plus composites. Aussi, sans plus approfondir les conditions locales auxquelles de telles configurations doivent satisfaire, considérons les propriétés globales de ces configurations minima, au travers d'un archétype relativement universel qui se manifeste souvent "naturellement", le pliage en "chevron". A la lumière de ses principales variations (évoquées surtout dans des dispositions ordonnées régulières) se dégageront des notions transposables à d'autres systèmes.

6.1 Pliabilité

Le chevron correspond à une distribution topologique élémentaire : nœuds de 4 segments, ne délimitant que des quadrilatères. Il doit être interprété comme une variété de quadrillage.



CHEVRON RÉGULIER ORDINAIRE
TOTALEMENT REPLIABLE - (NOTER
LA SYMÉTRIE DE DISTRIBUTION DES
PLUS SAILLANTS ET RENTRANTS)

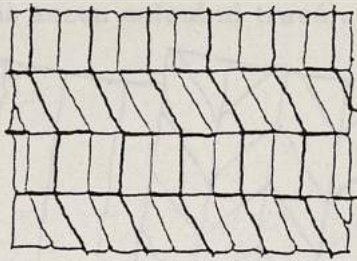


VARIÉTÉ DE CHEVRON
NI PLIABLE NI REPLIABLE
MALGRÉ SES CARACTÉRISTIQUES
LOCALES DE REPLIABILITÉ -

6.2 Repliabilité

Lorsque les couples d'angles opposés ne sont pas supplémentaires à chaque nœud, le pliage se bloque dans une position déterminée

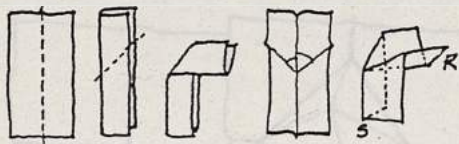
de l'espace (Ceci n'est dû qu'à la matérialité du support ; si les faces étaient libres de se croiser à la manière des rayons lumineux, la configuration pourrait se plier sans limitation. Elle ne pourrait toutefois être totalement repliable sur un plan, comme l'est le chevron symétrique).



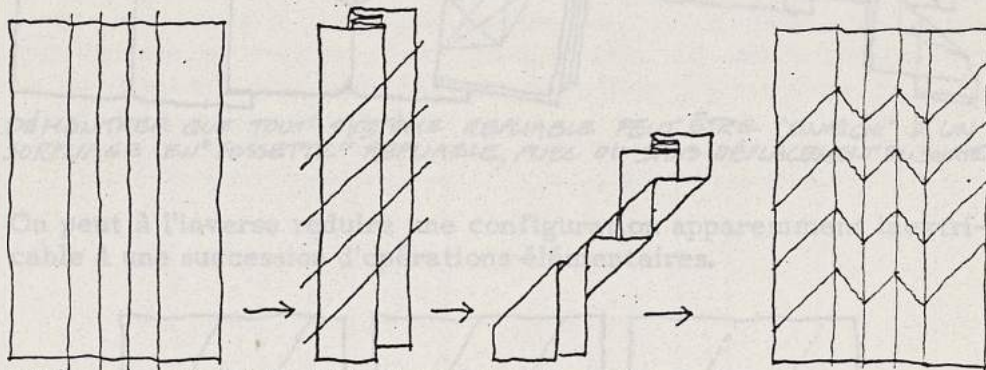
CHEVRON PLIABLE, NON REPLIABLE.

6.3 Niveau de complexité

De même que la fronce (ou pli composé) peut se comprendre comme la conjugaison de deux opérations successives de pliage simple, le pliage en chevron est à considérer comme la résultante de deux actions superposées.



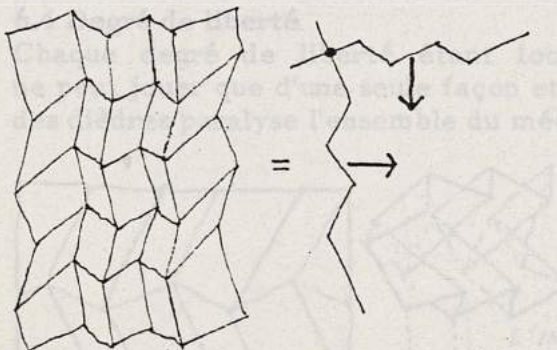
GENÈSE DE LA FRONCE BISSECTRICE PAR SURPLIAGE (CELA CORRESPOND À UNE INVERSION DU PLI PRIMAIRE DE SAILLANT EN RENTRANT AU PASSAGE DES PLS SECONDAIRES -)



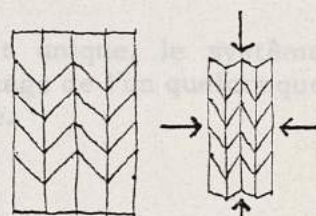
GENÈSE DU CHEVRON PAR SURPLIAGE (SUPERPOSITION DE PLUSIEURS PLIAGES)

Cela amène à comprendre tout pliage composé comme étant l'interférence de plusieurs influences élémentaires.

Cela explique pourquoi ce pliage se retracts (ou s'étend) simultanément selon deux directions convergeantes (ou divergeantes). Alors la matière, incompressible, pour ainsi dire chassée de son domaine initial qui se restreint, se déploie selon l'unique direction de liberté autorisée, l'extérieur, la troisième dimension.



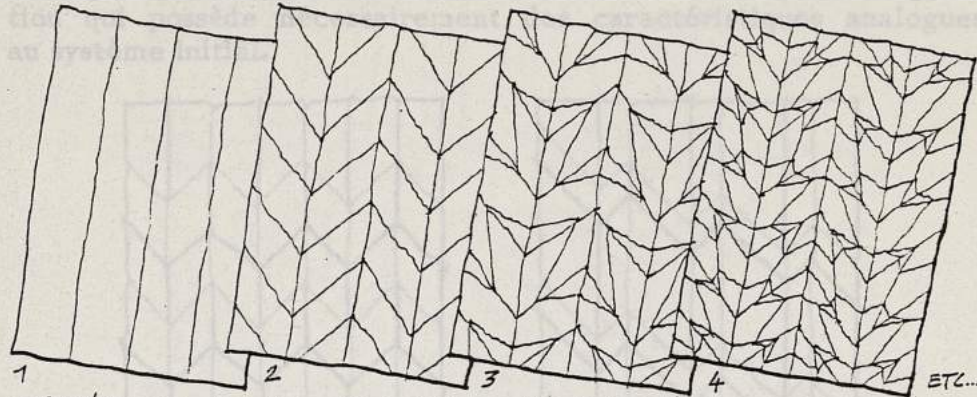
LE CHEVRON COMME SYSTÈME D'INTERFÉRENCE DE PLS (OU D'ONDES)



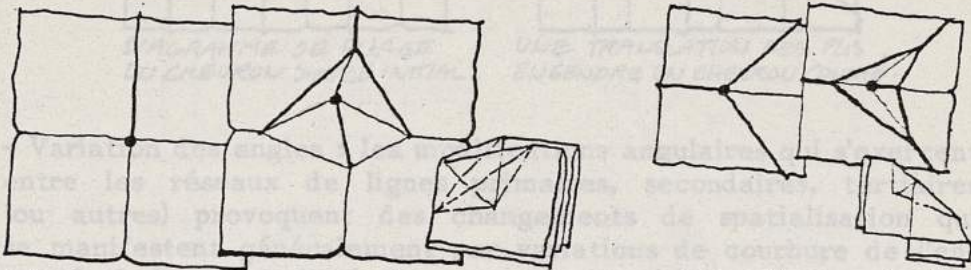
EXPANSION NORMALE
RÉTRACTION LATÉRALE
MODALITÉS DE PLIAGE DU CHEVRON

La superposition des actions de pliage peut être plurielle et est alors caractérisée par son degré de complexité.

Ainsi ce pliage au quatrième degré, qui superpose des interventions de pliage primaire, secondaire, tertiaire et quaternaire... (Il faut noter que de tels systèmes, symétriques par rapport au réseau de droites primaires, sont directement productibles par manipulation sans aucun calcul ni tracé).

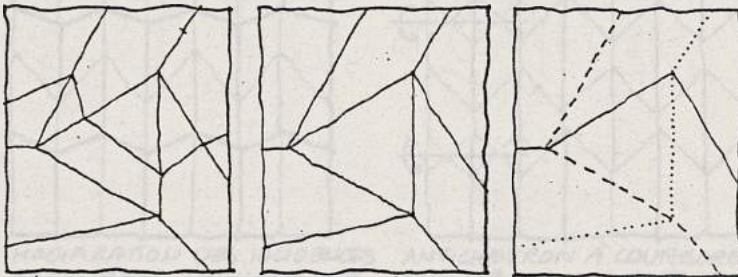


INTERFÉRENCES DE PLUS JUSQU'AU QUATRIÈME DEGRÉ DE COMPLEXITÉ -



DÉMONTRER QUE TOUT SYSTÈME REPLIABLE PEUT ÊTRE "ENRICHIR" D'UN SURPLIAGE EN "FOSSETTE" REPLIABLE, AVEC OU SANS DÉPLACEMENT DU SOMMET.

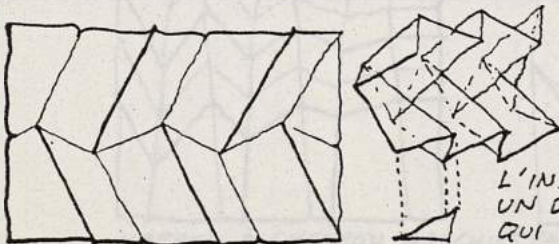
On peut à l'inverse réduire une configuration apparemment inextricable à une succession d'opérations élémentaires.



RÉDUCTION DE LA COMPLEXITÉ D'UN PLIAGE À UNE SUPERPOSITION D'ACTIONS ÉLÉMENTAIRES CONSÉCUTIVES.

6.4 Degré de liberté

Chaque degré de liberté étant localement unique, le système ne peut jouer que d'une seule façon et le blocage de l'un quelconque des dièdres paralyse l'ensemble du mécanisme.



L'INSERTION D'UNE FACETTE DANS UN DIÈDRE FORME UN TRIÈDRE QUI IMMOBILISE L'ENSEMBLE -

6.5 Anamorphose

La connaissance des formes procède essentiellement des transformations qui les engendrent. Aussi le pliage, dont les comportements sont étroitement dépendants de rapports angulaires, amène à considérer des transformations qui opèrent sur les valeurs d'angle.

- Conservations des angles : une simple translation parallèle des lignes, préservant les angles, engendre une nouvelle configuration qui possède nécessairement des caractéristiques analogues au système initial.

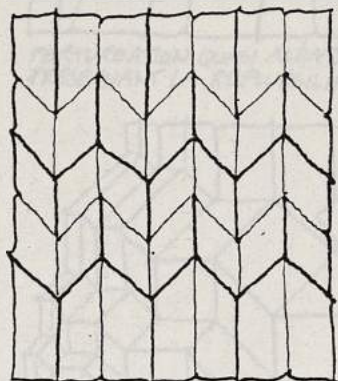
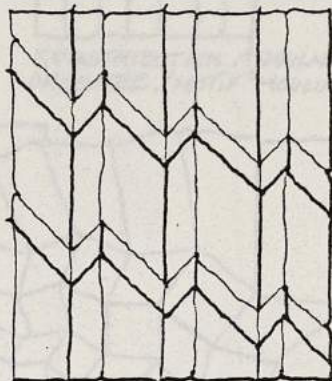
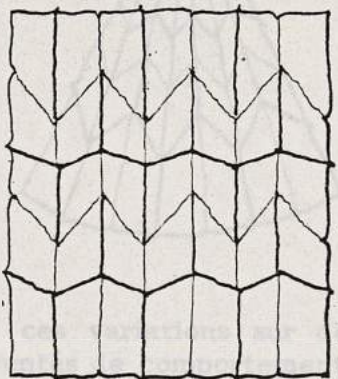


DIAGRAMME DE PLIAGE
DU CHEVRON SIMPLE INITIAL.

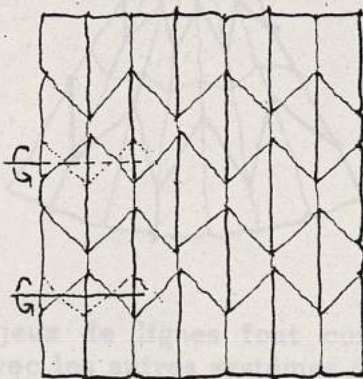


UNE TRANSLATION DES PLIS
ENGENDRE UN CHEVRON COUCHÉ.

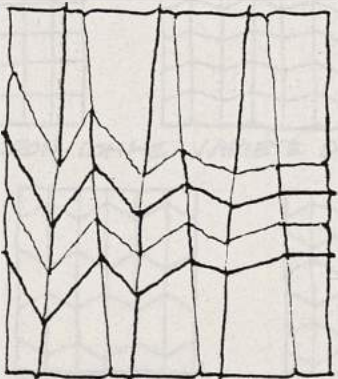
- Variation des angles : les modifications angulaires qui s'exercent entre les réseaux de lignes primaires, secondaires, tertiaires (ou autres) provoquent des changements de spatialisation qui se manifestent généralement par variations de courbure de l'ensemble de la nappe plissée.



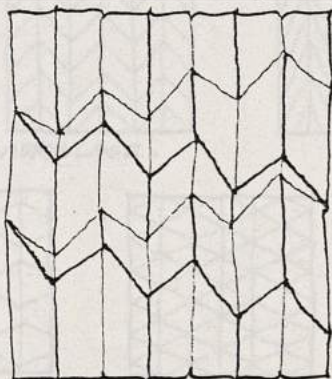
MODIFICATION DES INCIDENCES
ANGULAIRES AMENANT UNE
COURBURE EN BERCEAU
CYLINDRIQUE.

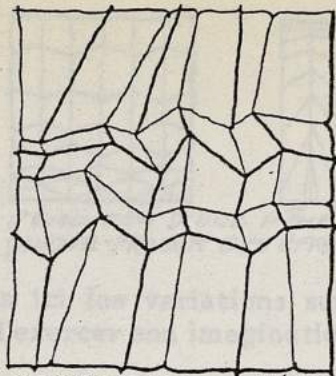


ANTICHEVRON À COURBURE
CYLINDRIQUE PAR ROTATION
ALTERNÉE DES TRAVÉES (QUI
INDUIT UNE MODIFICATION DES
AFFECTATIONS SAILLANT/RENTRANT)

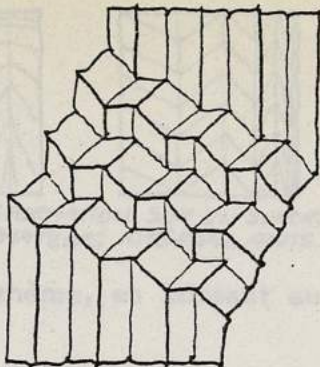


NAPPES À CHEVRON GAUCHES PAR DES JEUX D'ALTERNANCE.

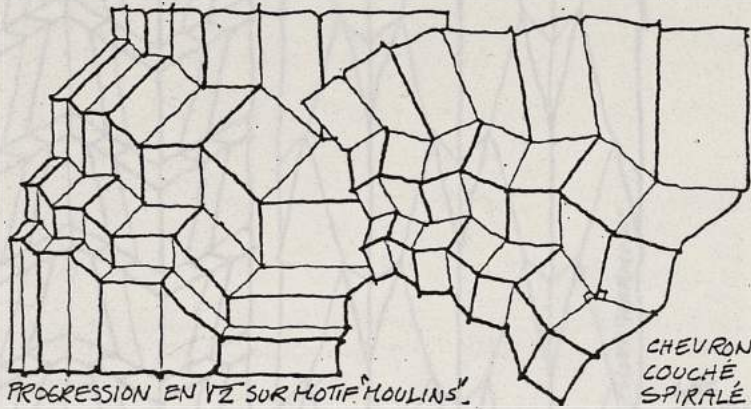




PERTURBATION QUASI ALÉATOIRE
PRÉSERVANT LA RÉGULARITÉ -

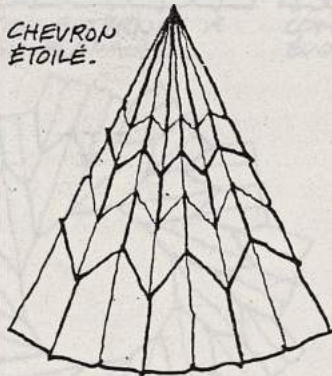


RÉDISTRIBUTION ANGULAIRE
ORIENTÉE. (MOTIF "MOULINS")

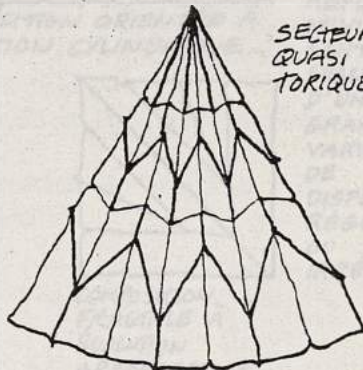


PROGRESSION EN VZ SUR MOTIF "MOULINS"

CHEVRON
COUCHÉ
SPIRALÉ -

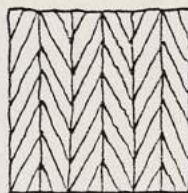
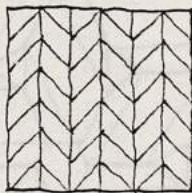
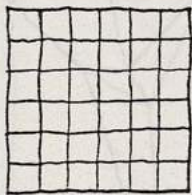


CHEVRON
ÉTOILÉ -

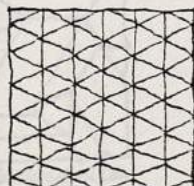
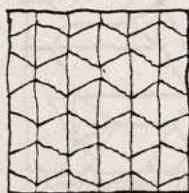
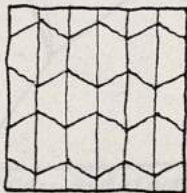


SECTEUR
QUASI
TORIQUE -

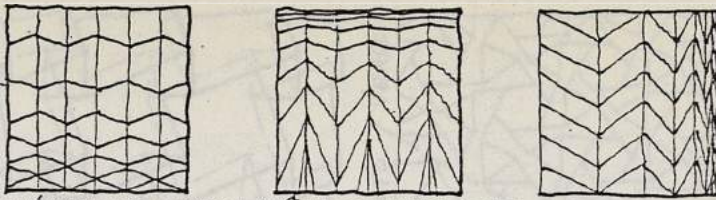
Toutes ces variations sur des jeux de lignes font comprendre les parentés de comportement avec les autres systèmes de recouvrements de plis.



LE CHEVRON COMME VARIÉTÉ DE QUADRILLAGE -

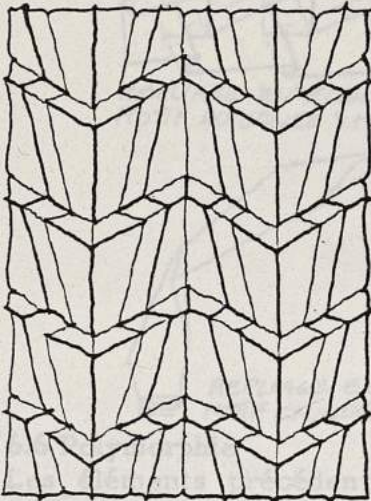


DE L'ANTICHEVRON AU RÉSEAU TRIANGULAIRE PLIABLE.

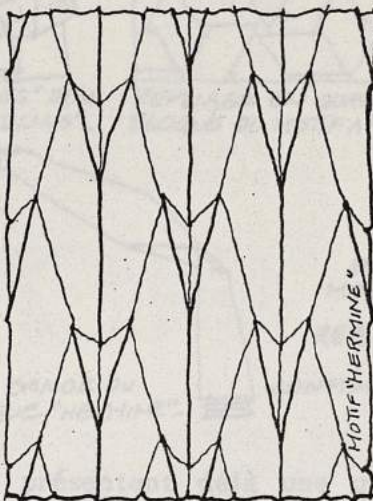


L'ÉVOLUTION D'UNE MÊME TRANSFORMATION SUR UN SUPPORT UNIQUE PRODUIT DES EFFETS FORMATEURS INTÉRESSANTS.

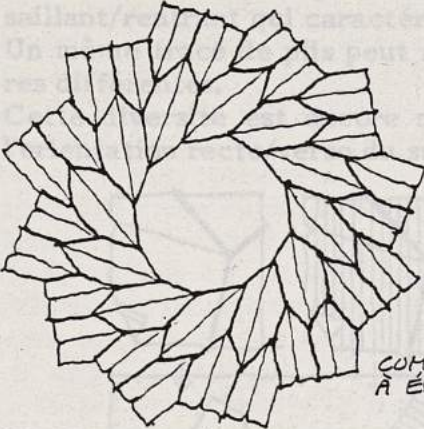
Limitons ici les variations sur ce thème, en laissant au lecteur le soin d'exercer son imagination.



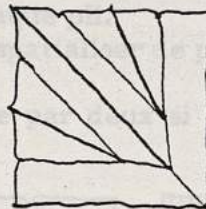
COMPOSITION ALTERNÉE À ÉVOLUTION PLANAIRE -



COMPOSITION ORIENTÉE À ÉVOLUTION CYLINDRIQUE -



COMPOSITION ROTATOIRE À ÉVOLUTION CONVEXE -

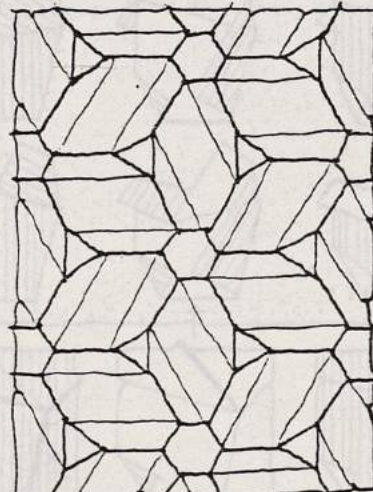


COMPOSITION FRACTALE À ÉVOLUTION ARBORESCENTE -

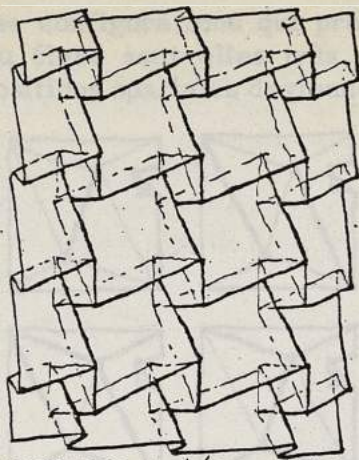
LES CONFIGURATIONS REPLIABLES MINIMA SONT SUSCEPTIBLES D'UNE GRANDE VARIÉTÉ DE DISPOSITIONS RÉGULIÈRES OU IRRÉGULIÈRES



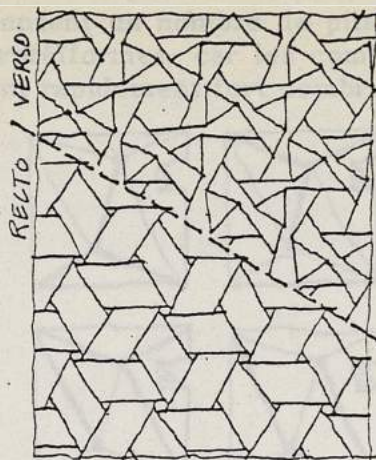
COMPOSITION ALÉATOIRE À ÉVOLUTION DÉSORDONNÉE -



COMPOSITION TRIDIRECTIONNELLE À ÉVOLUTION PLANAIRE EN "SHOCK"



REPLIAGE EN "ÉCAILLES" D'UN MOTIF DU GENRE "MOULINS".



REPLIAGE EN QUASI-TRESSAGE BLOQUÉ DU MOTIF "SHOCKS".

RECTO / VERSO



REPLIAGE EN BANDE DU MOTIF CYLINDRIQUE "HERMINE".

LES DIVERSES MODALITÉS DE REPLIABILITÉ DES CONFIGURATIONS MINIMA

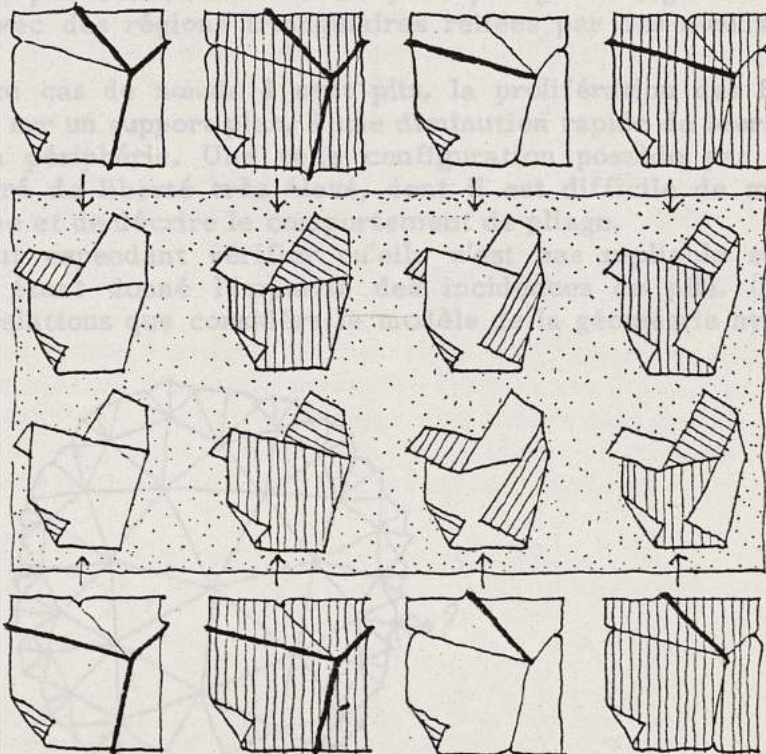
6.6 Polymorphie

Les éléments précédents présentent déjà une grande diversité de possibilités de formes au seul niveau des incidences de lignes.

Cette richesse s'élargit encore par la distinction des orientations saillant/reentrant qui caractérisent chaque pli.

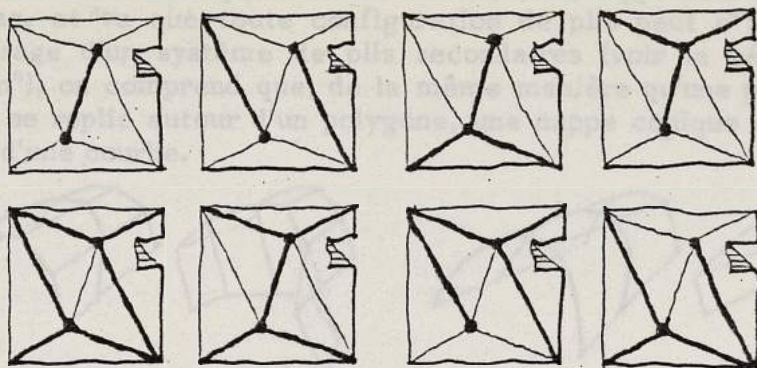
Un même tracé de plis peut alors se spatialiser de plusieurs manières différentes.

Cette diversité est encore multipliée par deux si l'on différencie l'orientation recto/verso du support.

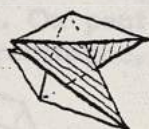


LES HUIT FAÇONS DE REPLIER UNE FRONCE RECTANGLE SUR UN SUPPORT ORIENTÉ EN TENANT COMPTE DES RECTO/VERSO.

Ainsi les configurations qui présentent un nombre de plis un tant soit peu élevé sont-elles très protéiformes, car les combinaisons de dispositions spatiales deviennent rapidement fort nombreuses.



LES HUIT FAÇONS DE SPATIALISER UN PLIAGE MINIMUM A DEUX SOMMETS SUR UN SUPPORT ORIENTÉ, EN FONCTION DES AFFECTATIONS S/R, SANS JOUER DU RECTO/VERSO.



À QUELLE COMBINAISON CORRESPOND LE REPLIAGE ?

6.7 Configurations saturées

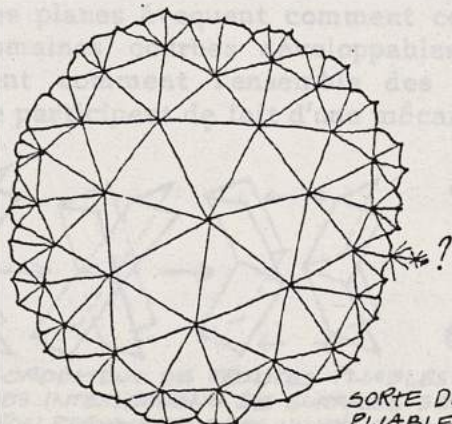
Sans développer davantage les propriétés fondamentales des configurations minima, envisageons la manière dont, à l'autre extrême, sont régies les configurations "maxima", c'est-à-dire celles dont le nombre de plis autour de chaque sommet est élevé.

On achoppe rapidement là sur les données géométriques qui conditionnent la distribution des connexions sur une surface.

Le triangle étant la plus élémentaire des unités bidimensionnelles délimitées par des droites, il n'est pas possible de descendre en deçà de ce type de fragmentation. Et toutes les combinaisons ne sont pas autorisées : on ne peut pas paver régulièrement le plan avec des régions triangulaires reliées par des nœuds à sept plis...

Dans ce cas de nœuds à sept plis, la prolifération des facettes oblige, sur un support plan, à une diminution rapide de leurs tailles vers la périphérie. Une telle configuration possède par ailleurs un degré de liberté très élevé, dont il est difficile de maîtriser la forme et de décrire le comportement de pliage.

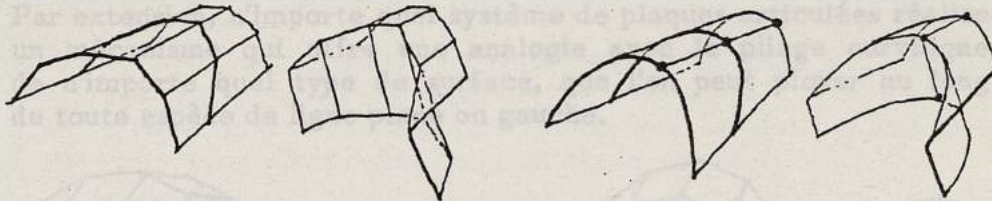
On peut cependant vérifier qu'elle n'est pas repliable sur elle-même étant donné l'imparité des incidences de plis. (Il s'agit là de relations que considère le modèle de la géométrie hyperbolique).



SORTE DE PAUVAGE HYPERBOLIQUE PLIABLE MAIS NON REPLIABLE -

7 DU PLIAGE RECTILIGNE AU PLIAGE CURVILIGNE

Etant donné la parenté qui existe entre une surface polyédrique par une succession de plans et une surface développable à courbure continue, et vu que toute configuration de plis peut s'"inverser" au passage d'un système de plis secondaires (voir la genèse du chevron"), on comprend que, de la même manière qu'une pyramide plissée se replie autour d'un polygone, une nappe conique se replie autour d'une courbe.

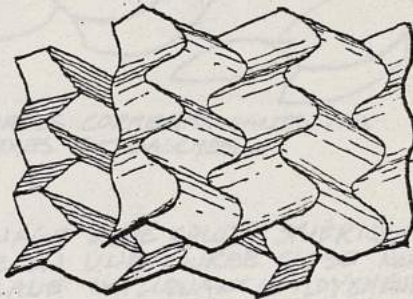


CORRESPONDANCE ENTRE PLIAGE RECTILIGNE ET PLIAGE CURVILIGNE -

Aux arêtes du polyèdre correspondent les génératrices rectilignes de la surface courbe. On peut ainsi faire correspondre à chaque situation de pliage rectiligne, une situation associée par pliage curviligne.

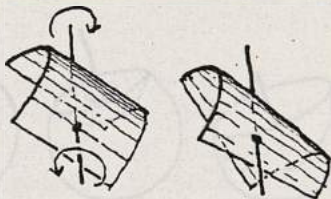


FRONCES
RECTILIGNE ET
CURVILIGNE -



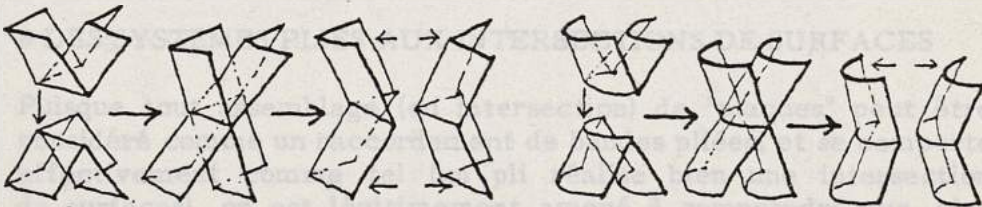
PLANS EN CHEVRON RECTILIGNE ET
ONDES À PLIAGE CURVILIGNE -

Cependant, chaque pliage curviligne, qui nécessite un cintrage de la surface, possède en fait une aptitude au mouvement supérieure à son équivalent rectiligne puisque les génératrices rectilignes n'étant pas "marquées" sur la surface, celle-ci est dès lors libre de ployer selon toutes les directions.

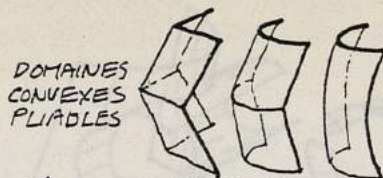


MOBILITÉ ÉLEVÉE D'UNE
FEUILLE PLOYÉE NON PLIÉE.

Certains raccordements élémentaires de pliages rectilignes de surfaces planes évoquent comment ceux-ci expliquent le cintrage des domaines courbes développables, convexes ou gauches, et montrent comment l'ensemble des pliages et déformations de surface participent de fait d'une mécanique analogue.

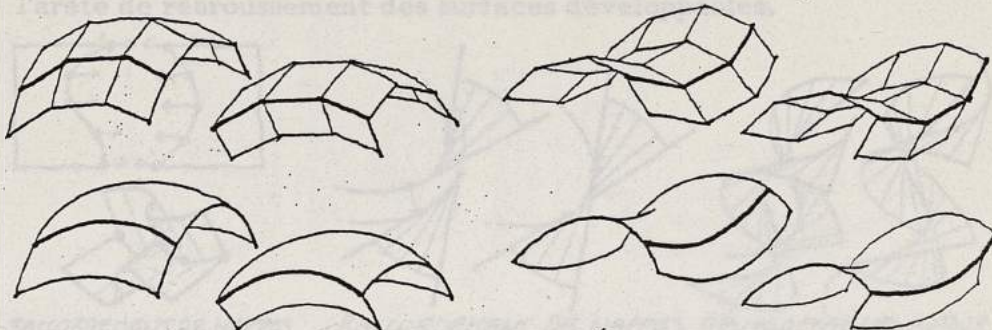


LE RACCORDEMENT DE FRONCES PLIABLES RECTILIGNES OU CURVILIGNES
FORME DES INTERSECTIONS DE SURFACES SEMBLABLEMENT PLIABLES - LEURS
DISSOCIATION REFORME DONC DES UNITÉS ELLES AUSSI PAREILLEMENT PLIABLES -

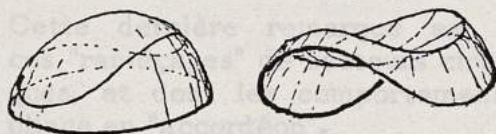


CES NOUVELLES UNITÉS AINSI DÉFINIES RÉALISENT L'APPROXIMATION DE DOMAINES GAUCHES ET CONVEXES À COMPORTEMENT MÉCANIQUE ANALOGUE.

Par extension, n'importe quel système de plaques articulées réalise un mécanisme qui offre une analogie avec le pliage curviligne de n'importe quel type de surface, que l'on peut ployer au long de toute espèce de ligne plane ou gauche.

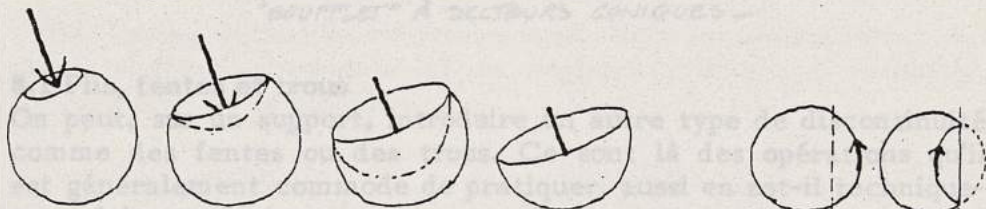


PLIAGES RECTILIGNES DE SURFACES POLYEDRÉES CORRESPONDANTS AUX PLIAGES CURVILIGNES DE DOMAINES CONVEXES ET GAUCHES -



PLIAGE D'UNE CALOTTE SPHÉRIQUE SELON UNE COURBE CLOSE NON PLANE IMPLIQUANT LE PLOYEMENT DE LA SURFACE -

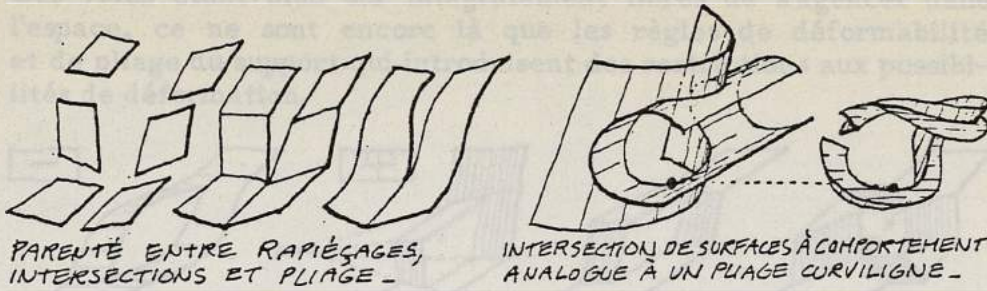
A l'inversion du pli saillant en pli rentrant correspond alors l'inversion de la convexité de la surface en concavité (ou réciproquement), témoignant que le pliage est aussi une transformation de "retournement" par laquelle se réalise une inversion de l'orientation du support, équivalente alors à une opération de réflexion.



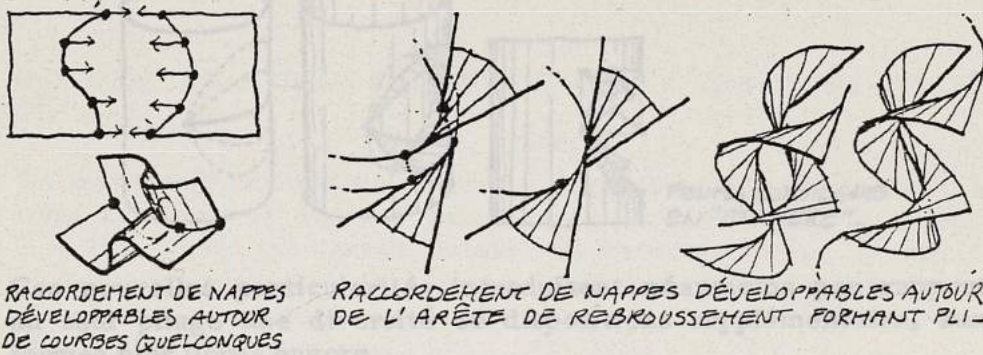
PHASES INITIALES DE RETOURNEMENT DE LA SPHÈRE ET SYMÉTRIE DE RÉFLEXION

8 DES SYSTEMES PLIES AUX INTERSECTIONS DE SURFACES

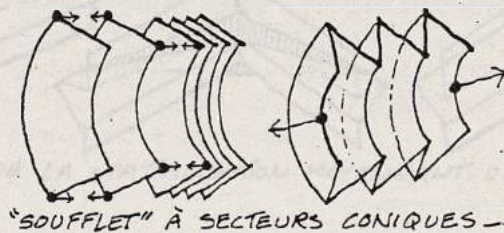
Puisque tout assemblage (ou intersection) de "plaques" peut être considéré comme un raccordement de bandes pliées, et se comporte effectivement comme tel (un pli réalise bien une intersection de surfaces), on est légitimement amené à comprendre que, plus généralement, toute intersection de surface se comporte mécaniquement comme un pliage curviligne.



Aussi bien n'importe quel raccordement de surfaces au long de n'importe quelle courbe est apparentable à un pliage.
Il en va pareillement des singularités linéaires, comme par exemple l'arête de rebroussement des surfaces développables.



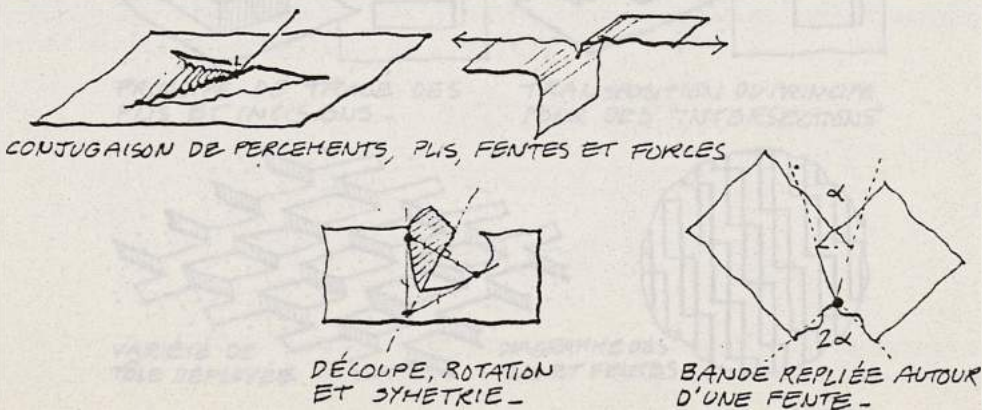
Cette dernière remarque est particulièrement évidente pour ces "rapiégages" de secteurs circulaires au long de courbes identiques, et dont les comportements ne diffèrent guère du simple pliage en "accordéon".



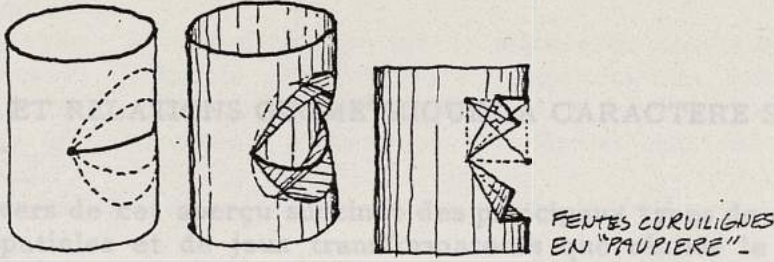
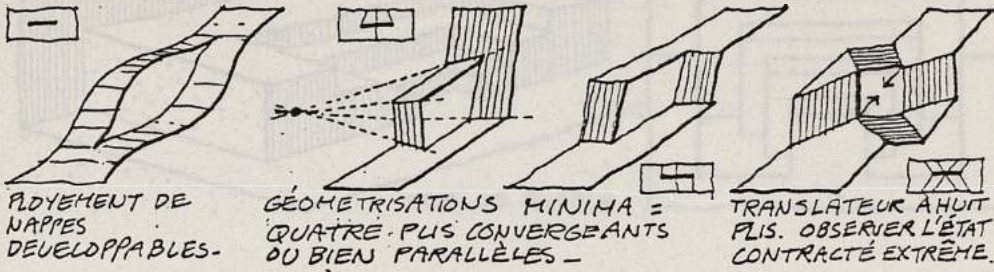
8.1 Plis, fentes et trous

On peut, sur un support, introduire un autre type de discontinuité comme des fentes ou des trous. Ce sont là des opérations qu'il est généralement commode de pratiquer, aussi en est-il techniquement fait grand usage.

Il faut remarquer que ces nouvelles singularités vont étroitement de pair avec le pliage.



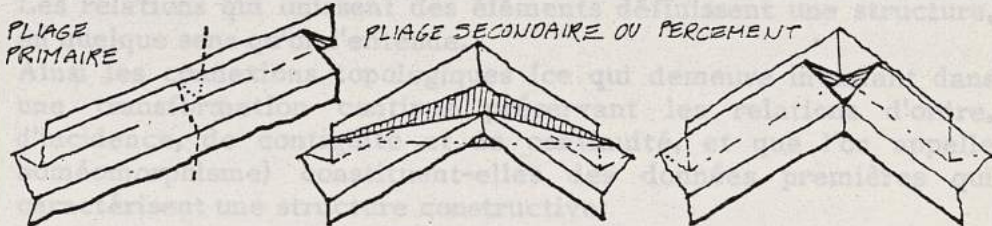
Ces vides étant bien sûr intégralement libres de s'agencer dans l'espace, ce ne sont encore là que les règles de déformabilité et de pliage du support qui introduisent des restrictions aux possibilités de déformation.



Ces nouvelles particularités introduisent néanmoins par rapport au seul pliage une diversité de dispositions supplémentaire, aux formes plus libres encore.

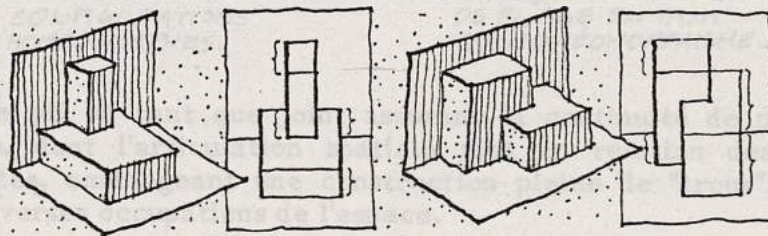
On peut caractériser deux grands registres de configuration :

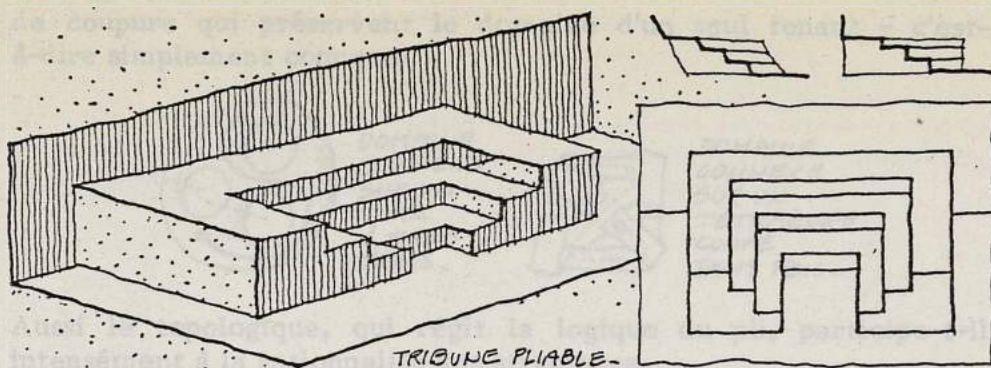
- Les variations locales sur un système plié normal.



SIMPLIFICATION DE LA SPATIALISATION MOYENNANT UNE INCISION.

- De toutes nouvelles conformations, dont la spatialisation est alors parfois surprenante et le registre difficile à délimiter, tant il existe de possibilités.





9.2 Orientation

Conjointement à l'apparition du pli se manifeste une orientation (un choix ?). C'est à une propriété morphologique essentielle

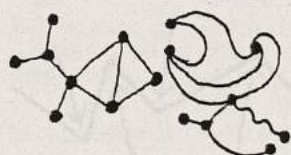
9 PLIS ET RELATIONS GEOMETRIQUES A CARACTERE STRUCTURAL

Au travers de cet aperçu succinct des principaux types de dispositions spatiales et de jeux transformateurs que réalise le pliage, il a été dégagé un certain nombre de caractéristiques géométriques, dont il convient de préciser pour chacune les types d'aptitudes structurantes auxquelles elles prédisposent - et dont voici un récapitulatif schématique.

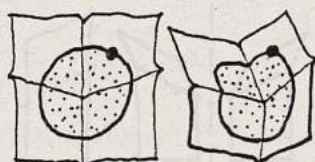
9.1 Connexité

Les relations qui unissent des éléments définissent une structure, en quelque sens qu'on l'entende.

Ainsi les connexions topologiques (ce qui demeure invariant dans une transformation continue préservant les relations d'ordre, d'incidence, de contiguité et de continuité, et que l'on appelle homéomorphisme) constituent-elles des données premières qui caractérisent une structure constructive.



CONFIGURATIONS HOMÉOMORPHES -

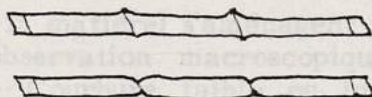
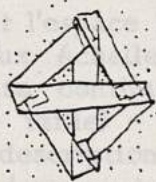


DU PLIAGE EN TANT QU' HOMÉOMORPHISME -

D'où le pli en tant que joint assurant la continuité de plusieurs parties, dont l'articulation spatiale met en relation des unités disjointes, aménageant une construction pleine de "trous" autorisant diverses occupations de l'espace.

9.3 Courbure

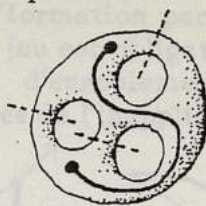
Les forces qui agissent sur une bande pliée (orientée) ont pour effet de créer une courbure au régime d'équilibre. Cette courbure est due à une apparition d'un pli (autre problème de pliage) qui est la plus profonde de la bande pliée. Ce pli, qui est la plus profonde de la bande pliée, est la plus profonde de la bande pliée.



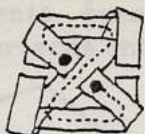
TÉTRAÈDRE CONSTITUÉ DE DEUX BANDES ÉVANTIOMORPHES -

Ainsi ce tétraèdre constitué de deux bandes pliées raccordées est homéomorphe à un disque à trois trous (il existe trois types

de coupure qui préservent le domaine d'un seul tenant - c'est-à-dire simplement connexe).



DOMAINE
CONNEXE
SUR UN
TORE
À TROIS
TROUS.



DOMAINE
CONNEXE
SUR UN
TÉTRAÈDRE
COUPÉ
TROIS FOIS.

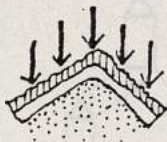
Aussi le topologique, qui régit la logique du pli, participe-t-il intensément à la rationalité des structures.

9.2 Orientation

Conjointement à l'apparition du pli se manifeste une orientation (un choix ?). C'est là une propriété morphologique essentielle parce qu'universelle, simultanément distribution spatiale, temporelle (durée et mouvement) et physique (les forces sont des entités orientées).

C'est en fonction d'une telle notion que l'on distingue successivement :

- la faculté de contenance du pli, simultanément abri protecteur et dissimulateur, dont découlent corollairement des différenciations épidermiques.
- la direction d'un mouvement (expression d'une tendance, résultat d'une attirance ou répulsion).
- des équilibres de force - ou des déséquilibres orientés.
- il a déjà été noté que le pli modifie, et inverse même parfois l'orientation.



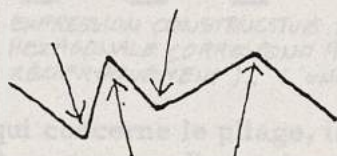
DIFFÉRENCIATION
PAR L'ORIENTATION



MOUVEMENT DIRIGÉ
(FERMETURE DU PLI)



CHANGEMENT DE
"SENS" PAR PLIAGE



SAILLANTS ET RENTRANTS DU PLI
DÉTERMINÉS PAR DES FORCES,
ÉLÉMENTS ORIENTÉS.



OBJETS ÉNANTIOMORPHES
ENGENDRÉS PAR AFFECTATION
DU SAILLANT ET RENTRANT.

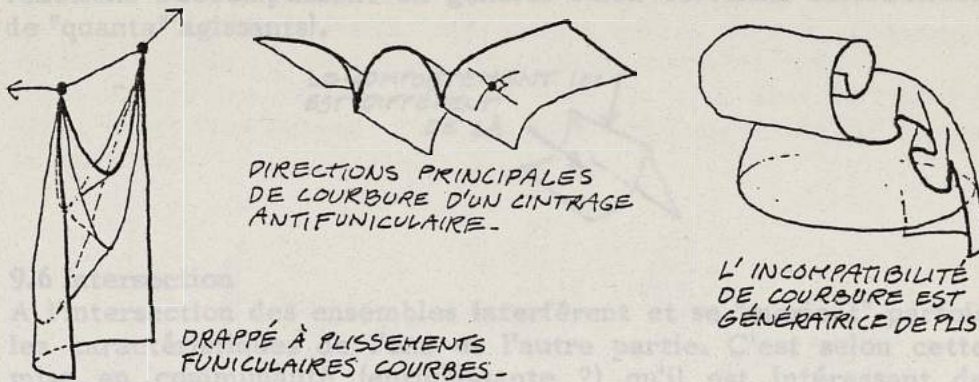
Aussi, dans un univers orienté (parce qu'orientable) s'exerceront "naturellement" et efficacement les actions de l'orientation (ce qui donne du "sens") et singulièrement ici par l'effet du pliage.

9.3 Courbure

Les forces et l'espace (donc la matière) s'aménagent par courbure (orientée) aux échelles d'observation macroscopique où règne une apparente continuité - Courbure faible ou intense (autre problème de taille) - Courbure, principe morphologique le plus profond de description des apparences et de résistance par la forme, qui s'exerce tantôt par accommodation directe de l'objet aux influences du milieu, tantôt par quelque cambrure d'opposition. Cette courbure est à considérer là où le pli participe du continu :

- continuité au long de la ligne de pli.

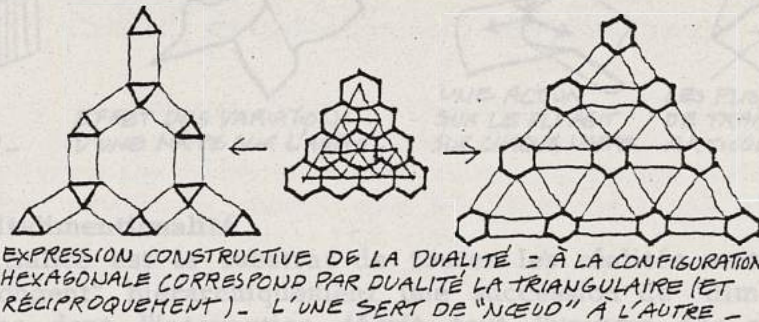
- courbure associée du support (courbure simple ou double, aux valeurs extrêmes selon deux directions perpendiculaires.
- Trans/formation par cintrage pour la mise en œuvre d'un matériau (ce jeu est obligatoire dans le cas du pliage curviligne s'accompagnant d'enroulements/déroulements éventuellement assujettis aux règles de l'inapplicabilité des surfaces entre elles).



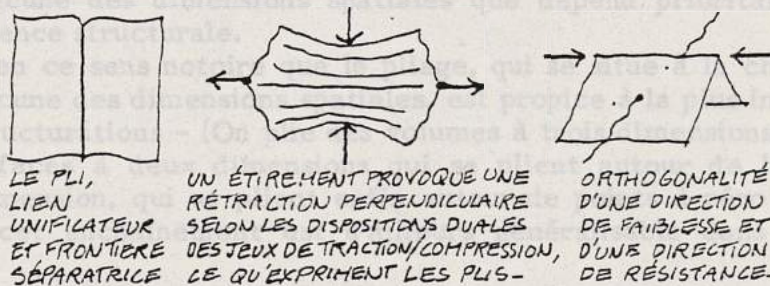
9.4 Dualité

Rien ne se conçoit qu'en fonction de la coexistence d'un contraire, par exemple, en termes de forces, traction implique compression, lesquelles s'équilibrent dans l'espace selon des directions antagonistes.

Morphologiquement cette dualité (ou double aspect d'une même réalité), s'observe régulièrement selon des configurations complémentaires indissociables, et dont la perpendicularité est l'état d'équilibre caractéristique du bidimensionnel (tels les réseaux d'isostatiques dans une pièce soumise à des contraintes).



En ce qui concerne le pliage, il est en plus intéressant de considérer le dualisme comme lien unissant / frontière de séparation, direction de faiblesse / direction de résistance, ou bien de toute autre manière selon la nature du phénomène plissant considéré.



9.5 Discontinuité

C'est là où les choses changent, et singulièrement là où elles changent le plus brusquement, qu'il se joue quelque chose d'important relativement au déroulement d'un phénomène ; et si le mode

de variation est déterminant pour la connaissance des formes quelles qu'elles soient, il l'est tout autant en matière de structure. En "dramatisant" la règle quasi universelle de la différenciation, le pliage réalise une radicalisation extrême qui le conduit à participer de la cohérence du discontinu (tout comme d'ailleurs maintes réactions s'accomplissent en général selon certaines interactions de "quanta" agissants).



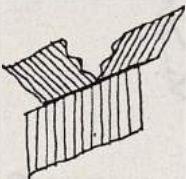
9.6 Intersection

A l'intersection des ensembles interfèrent et se "marient" parfois les caractéristiques de l'une et l'autre partie. C'est selon cette mise en communauté (enrichissante ?) qu'il est intéressant de considérer la ligne commune à plusieurs surfaces.

En tout pliage, le pli formant joint réunit au moins deux nappes, où l'on observe quelques interactions des faces.

- Spatialement : les "caprices" d'une nappe ont une résonance sur l'autre.

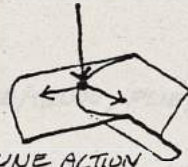
- Mécaniquement : une action sur une des faces agit sur l'autre via le pli, et réciproquement une action sur le pli se transmet sur chacune des nappes.



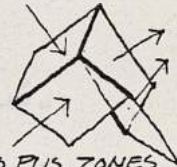
JOINT COMMUN -



EFFET DES VARIATIONS D'UNE NAPPE SUR L'AUTRE -



UNE ACTION SUR LE PLI AGIT SUR CHAQUE NAPPE -



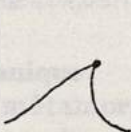
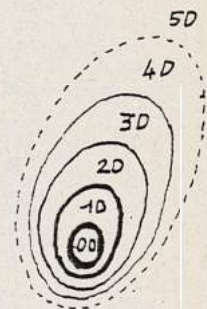
LES PUS, ZONES DE TRANSMISSION ARTICULAIRE -

9.7 Multidimensionalité

La spatialité est le substrat de toutes les réalités matérielles; s'y "plongent" hiérarchiquement une succession de "dimensions" spatiales dont l'interaction décrit tout l'univers des possibles en notre univers physique tridimensionnel.

Or, si l'art de composer des structures à résistance de forme consiste à jouer judicieusement de chacun des paramètres relatifs à la distribution de l'étendue, c'est de l'organisation adéquate de chacune des dimensions spatiales que dépend prioritairement l'efficacité structurale.

Il est en ce sens notoire que le pliage, qui se situe à la charnière de chacune des dimensions spatiales, est propice à la plus intégrale des structurations - (On plie des volumes à trois dimensions autour de surfaces à deux dimensions qui se plient autour de lignes à une dimension, qui se plient enfin autour de points à zéro dimension; cet enchaînement est d'ailleurs généralisable dans l'autre sens).



PLIAGE DE LIGNE AUTOUR DE POINT,

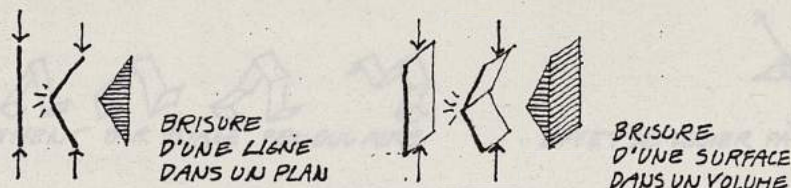


DE SURFACE AUTOUR DE LIGNE,

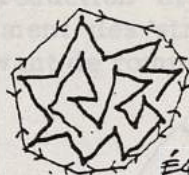


DE VOLUME AUTOUR DE SURFACE -

Ces données seront d'autant mieux agissantes qu'on les aménage selon la tendance à la spatialité inhérente à chaque nature d'effort, traction et compression, qui recomposent tous les types de travail. Les contraintes de compression tendent à trouver leur résolution dans une dimension spatiale supérieure (La matière, irréductible, astreinte à une limitation de son étendue, se dirige vers la seule issue possible, l'extérieur, c'est-à-dire évolue dans la dimension spatiale supérieure, ce qui peut s'accomplir par plissement). Ainsi une droite se brise dans un plan, un plan dans un volume, etc... (c'est bien entendu l'inverse pour l'état contraire qui réalise la traction).



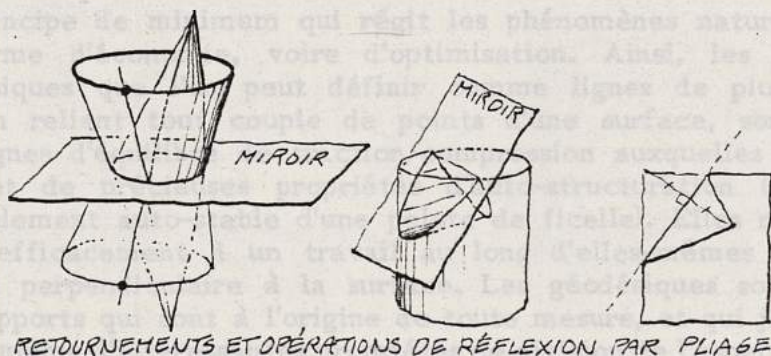
Et puisqu'il n'y a pas de compression sans quelque traction qui l'équilibre, et que tous les cas de travail réalisent la conjugaison de ces états de contrainte élémentaire, l'art de la composition structurale consiste finalement à orchestrer des ilots d'"hyperspatialité", compliquée, dont la propension à l'expansion est contenue par des étendues d'"hypospatialité", déployée.



ÉQUILIBRE COMPRIMÉ/TENDU, Plié/DEPLIÉ -

Observons au passage cette correspondance très profonde qui unit deux processus naturels de conservation que sont les réflexions et les pliages. De même qu'une réflexion, qui change l'orientation, doit être considérée comme une évolution dans une dimension spatiale supérieure, le pliage fait voyager un objet dans une dimension spatiale supérieure et en change l'orientation.

Cette correspondance fondamentale s'exprime avec plus d'évidence encore puisque par sa mécanique même, il faut en fait considérer le pliage comme une opération de réflexion.



RETOURNEMENTS ET OPÉRATIONS DE RÉFLEXION PAR PLIAGE

9.8 Mécanique

Chaque métamorphose résultant d'une force motrice évolue conjointement dans l'espace et dans le temps, selon un mouvement qui est par définition, une condition obligée de l'évolution. Or,

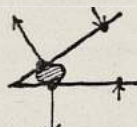
comment réduire le plus complexe des mécanismes à une conjugaison d'actions élémentaires ? C'est ce qu'effectue le pli, qui joue un rôle de charnière première, n'articulant que des rotations par le jeu desquelles on peut organiser toute espèce de déplacement.

Cette mécanique est à considérer sous deux aspects complémentaires.

- cinématique, relativement à la transmission de la motricité (à la rotation correspond par nature l'apparition des phénomènes périodiques).
- dynamique (relativement à l'acheminement des contraintes).



DÉPLACEMENT PAR PLIAGE PENDULAIRE



EFFET DE LEVIER PAR PLIAGE

Aussi, le pliage est-il fort adéquat pour la construction de tout système mobile, évolutif, provisoire.

Il est encore important à considérer en tant qu'adaptation naturelle de la matière aux sollicitations du milieu. Il s'accomplit d'ailleurs spontanément selon des règles d'économie par des transferts de matière très minimes. Son organisation formelle "raconte" tangiblement la résultante d'un processus complexe d'interactions. Par la production et l'analyse de plissements s'expérimente le comportement des structures : où, quand, pourquoi et comment ça plie, avant de rompre éventuellement ?



FRAGMENT DE BRISURE PAR PLIAGE

Les plissements présentent encore occasionnellement maintes autres dispositions spatiales à chacune desquelles correspond quelque implication structurale, et qu'il n'est pas possible d'inventorier systématiquement ici. En voici cependant encore deux exemples fort usuels.

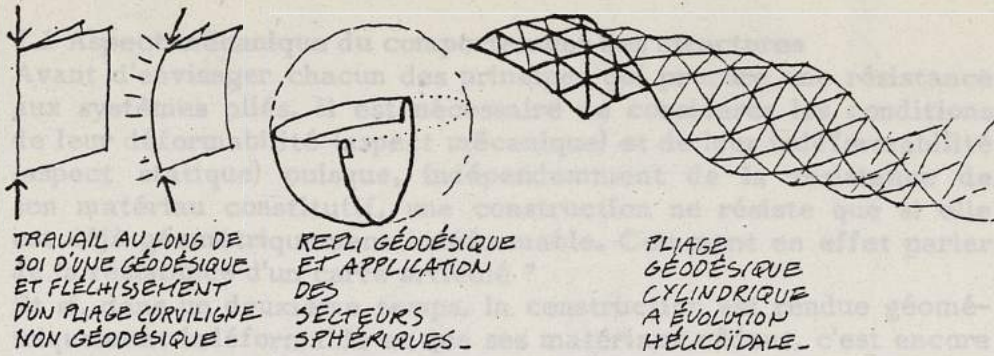
9.9 Géodésique

Le principe de minimum qui régit les phénomènes naturels, est synonyme d'économie, voire d'optimisation. Ainsi, les courbes géodésiques que l'on peut définir comme lignes de plus court chemin reliant tout couple de points d'une surface, sont donc des lignes d'équilibre de traction/compression auxquelles correspondent de précieuses propriétés d'auto-structuration (tel que l'enroulement auto-stable d'une pelote de ficelle). Elles résistent aussi efficacement à un travail au long d'elles-mêmes qu'à un travail perpendiculaire à la surface. Les géodésiques sont aussi des supports qui sont à l'origine de toute mesure, et qui jouissent par là même d'intéressantes propriétés de division de l'espace.

Toute droite sur une surface est une géodésique - aussi bien les systèmes engendrés par pliage rectiligne participent-ils de l'efficacité des géodésiques :

- résistance "normale" aux efforts au long de soi selon un travail élémentaire de traction/compression,

- division répétitive d'une surface,
- réalisation d'une parfaite applicabilité locale de la surface de part et d'autre d'un pli géodésique.



9.10 Répétitivité

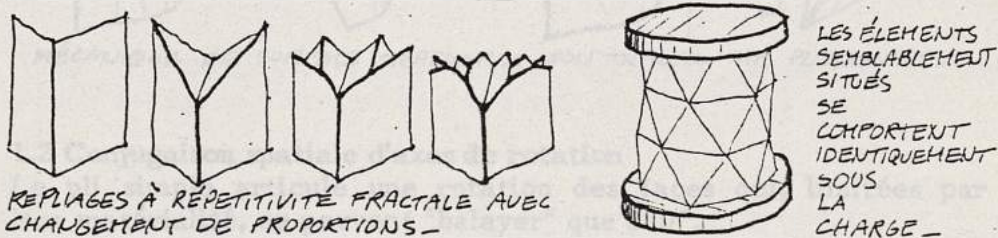
La reproduction est une condition naturelle de la conservation. Aussi la nature procède-t-elle par répétition, dont une des manifestations géométrico/structurale usuelle est la symétrie, synonyme d'identité spatiale et d'équilibre de force (et potentiellement génératrice d'harmonies).

Certaine logique structurale puriste voudrait que l'emploi d'éléments identiques ne corresponde qu'à des sollicitations similaires. On sait aussi que les sollicitations des constituants d'une construction dépendent de l'ordre qui les organise, ordre que l'on peut délibérément instituer selon un mode répétitif, alors possiblement siège de comportements semblables.

Alors se justifie la composition des systèmes structuraux fondés sur l'ordre répété, qui octroie aussi des facultés de standardisation et de coordination modulaire.

Le pliage conjugue naturellement ces principes puisqu'il est par essence générateur de symétries moyennant les superpositions qu'il aménage de part et d'autre du pli, et son caractère géodésique autorise la coordination directe et rigoureuse des mesures.

Notons que lorsque la répétitivité intervient au niveau du réemploi d'un même principe de composition qui s'effectue avec un changement de taille (tel qu'un processus automorphique) on est contraint à quelques contradictions en vertu du principe morphologique d'échelle qui édicte que lorsque change la taille des choses, change aussi nécessairement leurs formes ou proportions - (Ce problème de l'échelle, fondamental en matière de structure, sera développé par la suite).



C'est à partir de ce type de propriétés géométrico/structurales premières et de leurs subtiles combinaisons, pour autant qu'elles puissent coexister sur un même support, qu'il importe de comprendre les multiples effets structurants inhérents aux constructions plissées et dont il convient d'effectuer maintenant l'inventaire.

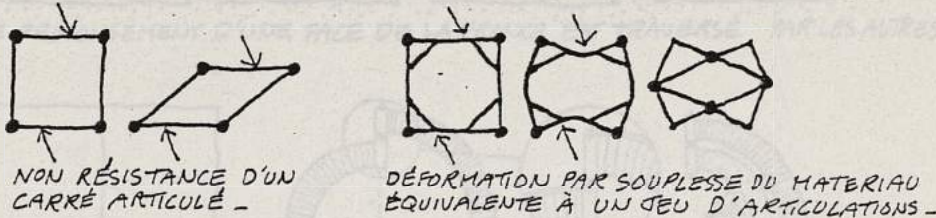
ROLES STRUCTURANTS DU PLI

1. MECANIQUE

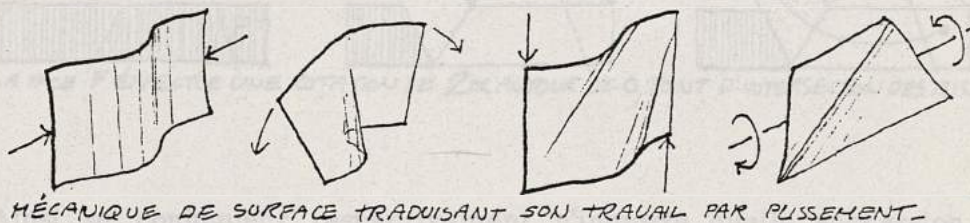
1.1 Aspect mécanique du comportement des structures

Avant d'envisager chacun des principes qui procure une résistance aux systèmes pliés, il est nécessaire de considérer les conditions de leur déformabilité (aspect mécanique) et de leur indéformabilité (aspect statique) puisque, indépendamment de la résistance de son matériau constitutif, une construction ne résiste que si elle est déjà géométriquement indéformable. Comment en effet parler de la résistance d'un carré articulé ?

Et si, dans un deuxième temps, la construction est rendue géométriquement indéformable et que ses matériaux cèdent, c'est encore selon un système mécanique "ployant" que s'accomplit la destruction.



Aussi, en plus des multiples usages classiques des systèmes articulés mobiles auxquels le pli participe, la mécanique nous intéresse parce qu'elle permet une compréhension profonde des comportements structuraux : Etant donné que la forme est essentiellement information, selon la manière dont un système se déforme, se déduit le travail de ses éléments constitutifs. (ploiement = flexion, rapprochement = compression, éloignement = traction, voilage = torsion, etc...). Et puisque généralement la matière plie avant de céder, ceci indique ce qu'il aurait fallu faire pour qu'il n'en soit pas ainsi. Et même si une structure "tient", elle présente des directions particulières de faiblesse et propose une mécanique virtuelle révélatrice de l'efficacité du système considéré et de l'importance respective de ses éléments constitutifs.



1.2 Conjugaison spatiale d'axes de rotation

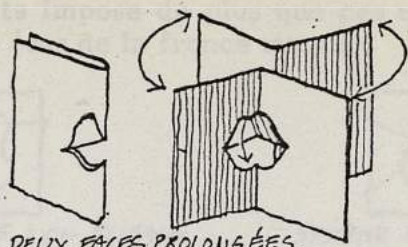
Le pli simple articule une rotation des faces qui, limitées par leur matérialité, ne peuvent "balayer" que 360°.

Certains artifices de maquette permettent cependant de réaliser un système qui généralise le mouvement et réalise la périodicité intégrale. On peut ainsi modéliser l'opération topologique abstraite d'"immersion" (faculté des constituants géométriques de se croiser librement sans entraver le déplacement). Ceci est surtout intéressant pour les systèmes de plis composés.

Il est intéressant d'apprécier sur modèle la mécanique élémentaire de tels systèmes, et d'explorer leurs multiples variations.



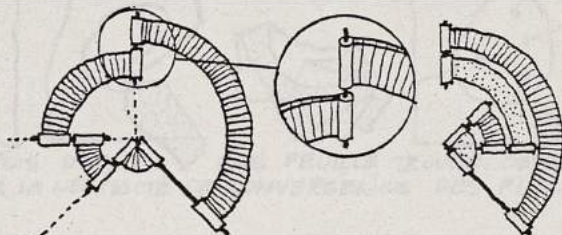
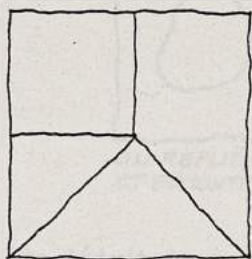
ROTATION DES FACES
LIMITÉE À 360°



DEUX FACES PROLONGÉES
SONT TRAVERSÉES PAR LES "LÈVRES"

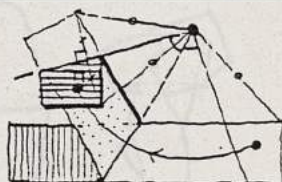
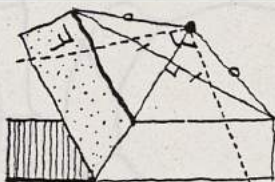
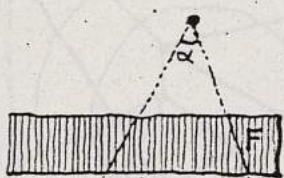


LE PROLONGEMENT D'UNE FACE DE LA FRONCE EST TRAVERSÉ PAR LES AUTRES



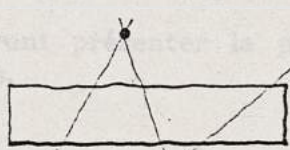
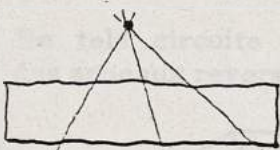
DISPOSITIF QUI PERMET AUX FACES
D'UNE FRONCE DE TOURNER SANS LIMITATIONS LES UNES PAR RAPPORT AUX AUTRES -

Le produit simultané de deux pliages (ou rotations d'axes coplanaires) possède deux degrés de liberté - et est donc équivalent à une rotation unique autour du point d'intersection des plis, correspondant mécaniquement à une rotule spatiale.



LA FACE F EFFECTUE UNE ROTATION DE 2α AUTOUR DE O, POINT D'INTERSECTION DES PLS.

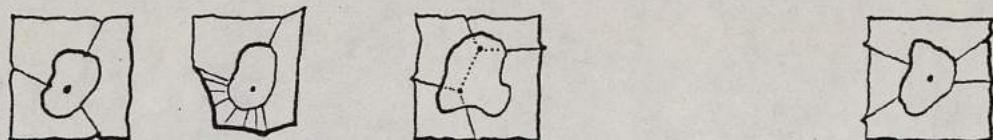
Ainsi se conjuguent respectivement n'importe quelle succession de pliages autour de divers pôles d'articulation.



PÔLES DE ROTATION DE PLIAGES COMPOSÉS -

Sur un circuit fermé (ou bien une feuille percée d'un trou) il est nécessaire qu'il y ait au moins quatre pliages (trois pliages ne formant qu'un trièdre indéformable).

La compatibilité des déplacements impose de plus que ces quatre plis convergent en un point unique (cas de la fronce simple).



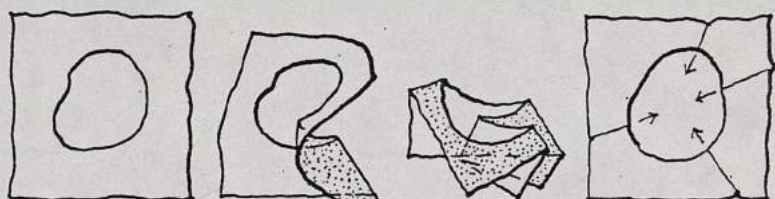
SYSTÈME NON PLIABLE, SINOY MOYENNANT PLOYEMENT D'UNE OU PLUSIEURS FACES -

SYSTÈME NON PLIABLE SINOY PAR PLOYEMENT DE FACE (NON CONVERGENCE DES PLIS)

SYSTÈME PLIABLE (AXES DE ROTATION COMPATIBLES)

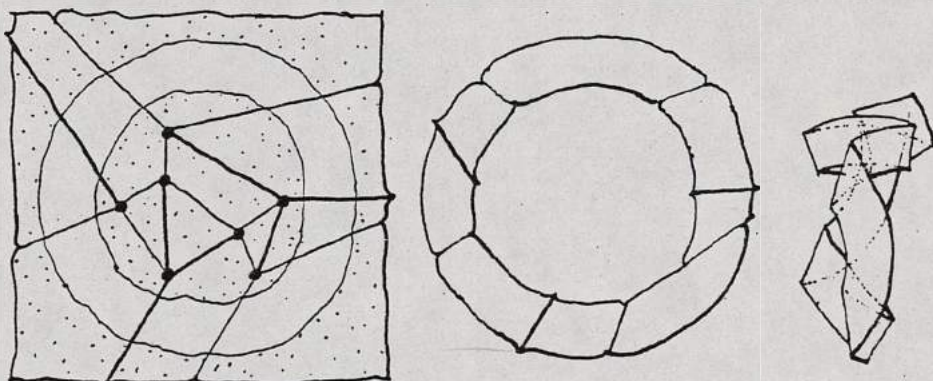
Réaliser l'expérience du repliement quelconque d'une feuille percée d'un trou.

Cette expérience élémentaire montre pourquoi et comment le chiffonnage d'une feuille de papier aplatie sur un plan organise une succession de fronces à incidences quadruples, qui respectent des règles d'incidence angulaire déjà énoncées plus haut.



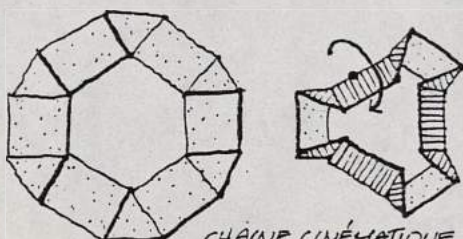
ON REPLIE PUIS DÉPLIE UNE FEUILLE TROUÉE. OBSERVER ET DÉMONTRE LA NÉCESSITÉ DE CONVERGENCE DES PLIS -

On déduit de ces situations les conditions de pliabilité et de repliabilité de n'importe quelle espèce de circuit fermé tel que l'anneau à huit plis ci-dessous. (Tout circuit articulé est (re)pliable s'il existe un réseau joignant les intersections de plis et formant un système (re)pliable).



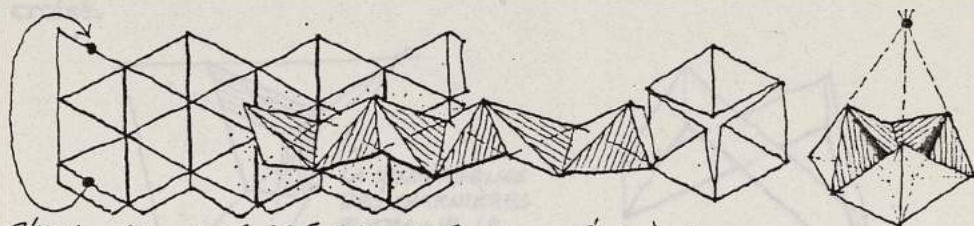
CIRCUIT TOTALEMENT REPLIABLE MOYENNANT DES RECOUPEMENTS INTERNES DES PLIS FORMANT UN SYSTÈME REPLIABLE -

De tels circuits peuvent présenter la particularité de réaliser des anneaux réversibles.

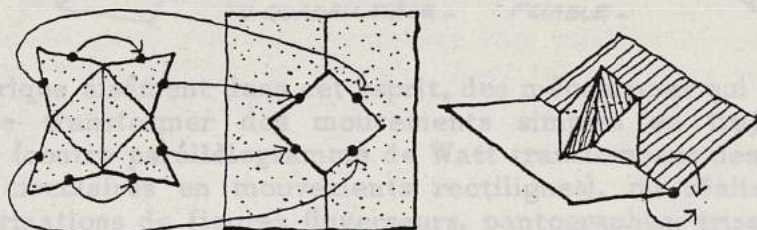


CHAÎNE CINÉMATIQUE REPLIABLE ET RÉVERSIBLE -

La généralisation de tels systèmes d'axes de rotation dans l'espace conduit aux classiques chaînes cinématiques, dont voici un exemple bien connu, constitué d'une chaîne de six tétraèdres articulés refermée en anneau - (Il s'agit là encore de la conjugaison spatiale de plusieurs axes de rotation globalement compatibles moyennant une certaine répartition de convergences locales).



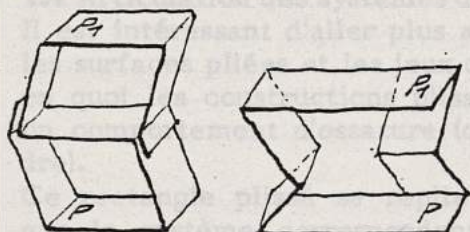
RÉSEAU TRIANGULAIRE FORMANT UNE CHAÎNE TÉTRAÉDRIQUE ANNULAIRE MOBILE.



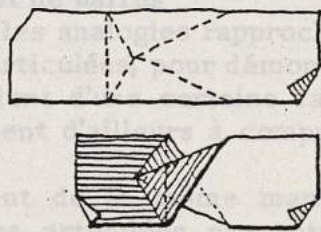
FOSETTE OCTAÉDRIQUE ARTICULÉE ILLUSTRANT LA THÉORIE DES POLYÈDRES PLIABLES -

1.3 Déplacements par conjugaison de rotations

Tout mouvement dans l'espace peut se décomposer par un jeu de rotations et de translations élémentaires. Or, il est possible d'engendrer un mouvement de translation par la conjugaison de plusieurs rotations inverses et simultanées. On sait donc recomposer toute espèce de déplacement par pliage, et ce d'une infinité de manières - (Sont illustrés ici quelques modèles élémentaires, étapes nécessaires à la compréhension de systèmes plus élaborés).



TRANSLATEURS (AXES D'ARTICULATION PARALLÈLES À UN MÊME PLAN)



RETOURNEMENT D'UNE BANDE PAR UN NOMBRE IMPAIR DE PLIS -

Les jeux de barres articulées qui permettent le tracé de courbes algébriques sont interprétables en systèmes plissés.

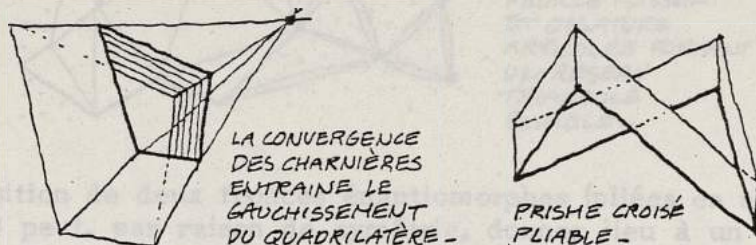
Le tracé de la courbe par tangentes, qui donne une vision complète des déplacements ponctuels, nécessite le repérage des centres instantanés de rotation qui organisent le mouvement. On obtient ce centre instantané de rotation C par l'intersection des rayons de rotation directs. La perpendiculaire à la droite joignant C au point mobile donne sa direction instantanée de déplacement, tangente à sa trajectoire.



LE POINT P DE CE PRISME PLIABLE DÉCRIT UNE LEMNISCATE (AVEC F COMME RÉFÉRENCE)

Il est intéressant de considérer l'analogie d'un système à charnières parallèles avec un système à charnières convergeantes, qui engendre un gauchissement du quadrilatère.

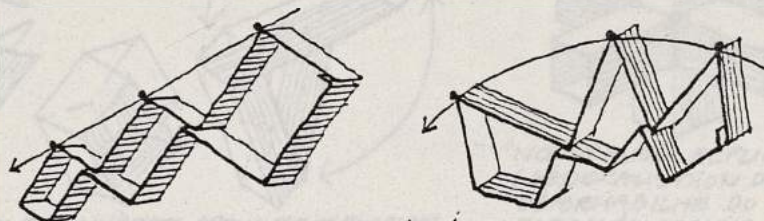
Grâce enfin aux libertés de positionnement qu'offre la tridimensionnalité, on peut construire effectivement des systèmes qui sembleraient paradoxaux dans le plan, tel que ce quadrilatère croisé.



LA CONVERGENCE
DES CHARNIÈRES
ENTRAÎNE LE
GAUCHISSEMENT
DU QUADRILATÈRE -

PRISME CROISÉ
PLIABLE -

On fabrique aisément dans cet esprit, des mécanismes qui permettent de transformer des mouvements simples en trajectoires variées (contre parallélogramme de Watt transformant des mouvements circulaires en mouvements rectilignes), ou réalisant des transformations de figures (inverseurs, pantographes, trissecteurs, etc...)

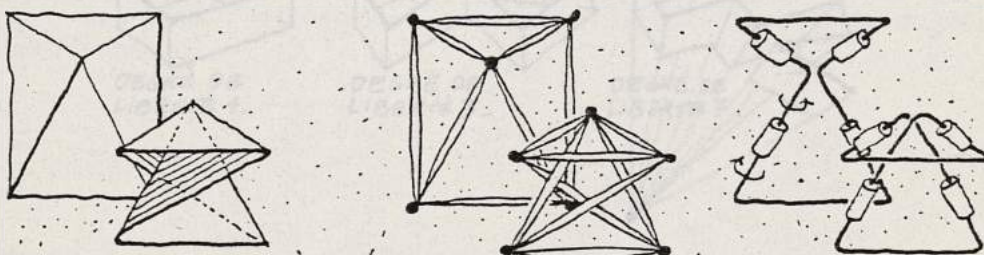


PLIAGES PANTOGRAPHIQUES À DÉPLACEMENT RECTILIGNE
ET CURVILIGNE -

1.4 Articulation des systèmes de plaques et de barres

Il est intéressant d'aller plus avant dans les analogies rapprochant les surfaces pliées et les jeux de barres articulées, pour démontrer en quoi les constructions plissées possèdent d'une certaine façon un comportement d'ossature (qu'elles aident d'ailleurs à comprendre).

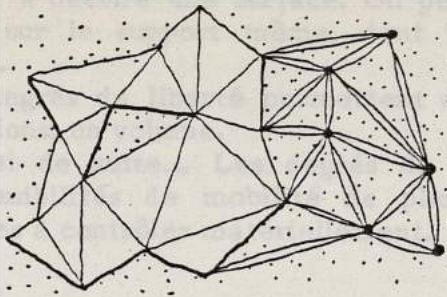
Ce rectangle plissé se replie exactement de la même manière que le système correspondant de barres articulées par rotules spatiales afin de pouvoir évoluer dans l'espace. La seconde interprétation de la même figure par éléments coudés reliés par des manchons cylindriques traduit d'une autre façon les jeux de rotation dont le pli est le siège.



FRONCE REPLIABLE ET MÉCANISMES DE BARRES ÉQUIVALENTS -

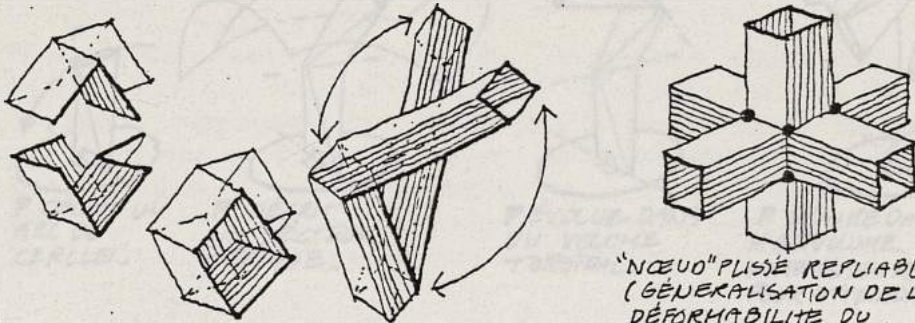
De telles analogies ne sont assurément possibles que pour les systèmes intégralement triangulés dans le plan, ce qui procure

l'invariance des longueurs, angles et aires, inhérente au pliage de surface.



FEUILLE PLISSÉE
ET OSSATURE
ARTICULÉE FORMANT
UN RÉSEAU
TRIANGULÉ
PLIABLE -

L'opposition de deux fronces énantiomorphes (pliées en sens contraires) peut, par raison de symétrie, donner lieu à un élément pliable. Ces quasi volumes tubulaires sont pliables ou repliables selon les valeurs d'angles opposés. Leur allongement réalise à d'autres échelles des ossatures articulées dont les "bras" s'applatissent.



FORMATION DE POLYÈDRES CREUX ET TUBULAIRES
RÉALISANT DES BRAS ARTICULÉS REPLIABLES -

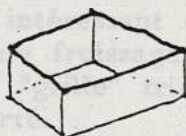
"NOEUD" PLISSÉ REPLIABLE
(GÉNÉRALISATION DE LA
DÉFORMABILITÉ DU
PARALLÉLOGRAMME À
CELLE DU PARALLÉLÉPIÈDE -

1.5 Contrôle du mouvement et degré de liberté

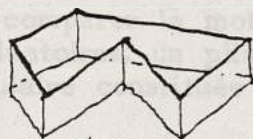
Précisons davantage la notion de degré de liberté d'un système articulé, que l'on peut schématiquement définir comme le nombre de liaisons manquantes pour paralyser un système, conformément à la relation classique définissant l'isostaticité pour les systèmes constitués de charnières C et de faces F :

$$2 C - 3 = F$$

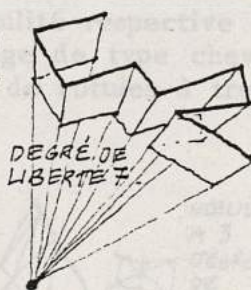
Il n'y a pas lieu de s'étendre plus sur l'application de cette formule, que de trop nombreux cas particuliers de disposition des charnières viennent compliquer. (Cette formule ne s'applique ici qu'aux systèmes à charnières convergentes ou parallèles).



DEGRÉ DE
LIBERTÉ 1 -



DEGRÉ DE
LIBERTÉ 3 -



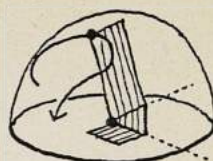
DEGRÉ DE
LIBERTÉ 7 -

Mentionnons qu'un degré de liberté unique autorise tout point du système à décrire un espace à une dimension, une courbe. Deux degrés de liberté permettent de décrire un monde à deux dimensions, une surface. (C'est ainsi que l'on est amené à considérer l'intersection de deux plis sur une bande comme une rotule

spatiale fictive, c'est-à-dire une articulation libre de s'orienter en toute direction de l'espace, pour autoriser l'extrémité de son support à décrire une surface. On peut encore matérialiser cette rotule sur le support même, dont l'extrémité décrit alors une sphère).

Trois degrés de liberté permettent de décrire un espace à trois dimensions, un volume.

Et ainsi de suite... Les degrés de liberté supérieurs octroient des possibilités de mobilité de plus en plus libre, rapidement difficiles à contrôler matériellement.



BRAS ARTICULÉ PAR DEUX PLS. SON EXTRÉMITÉ DÉCRIT UNE SPHÈRE CENTRÉE À L'INTERSECTION DES PLS.



RÉALISER LES ARTICULATIONS PAR PLIAGES ORTHOGONAUX D'UN TUBE -



P DÉCRIT UN ARC DE CERCLE -



P DÉCRIT UN SECTEUR TORIQUE -



P ÉVOLUE DANS UN VOLUME TOROÏDAL -



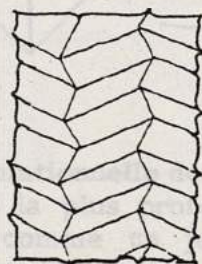
P GRAVITE DANS UN HYPERVOLUME. ILY A DE NOMBREUSES POSITIONS POUR ATTEINDRE P -

Le degré de liberté est une donnée constructivement importante, car c'est ce qui autorise le déplacement nécessaire à la mise en place d'un élément, ou encore le jeu indispensable à l'autorégulation d'une structure pour l'acheminement et la résolution de ses contraintes.

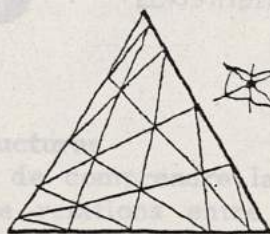
Ces propositions sont réciproques : pour un mouvement donné d'un support, des plis apparaissent selon une configuration qui réalise le degré de liberté minimum nécessaire pour articuler ce mouvement : si le déplacement est élémentaire, le degré de liberté est unique et la configuration de plis est alors relativement simple.

Si le mouvement doit être varié, changeant, le degré de liberté correspondant détermine une configuration à incidences de plis élevées.

Il est intéressant de comparer la mobilité respective de divers types de froissages aléatoires, un pliage de type chevron ainsi que la "grille" triangulaire constituée de rotules à trois degrés de liberté.



CHEVRON COUCHÉ À DEGRÉ DE LIBERTÉ UNIQUE -



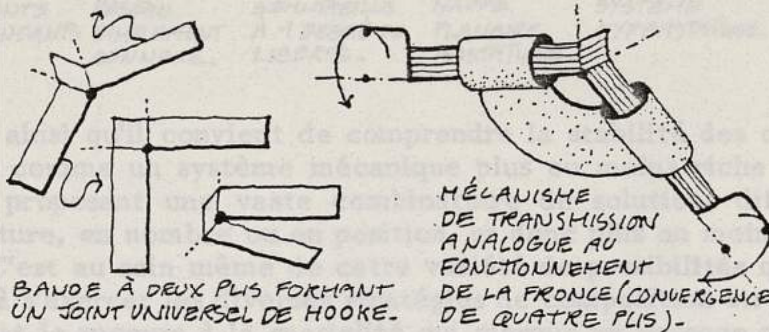
RÉSEAU PROJECTIF À 12 DEGRÉS DE LIBERTÉ -

NŒUDS A 3 DEGRÉS DE LIBERTÉ

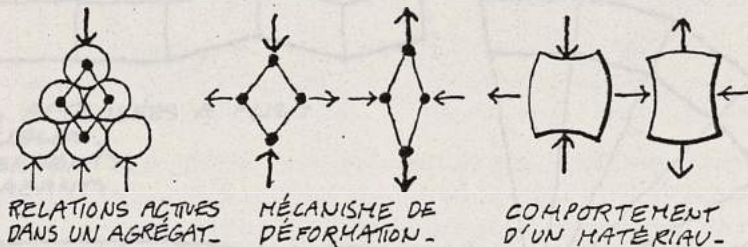
1.6 Mouvement et transmission de forces

Aux aspects cinématiques précédents, qui concernent l'accomplissement du mouvement, doivent être superposés les effets dynamiques, relatifs aux transmissions de forces.

Il n'est en matière de pliage de meilleure illustration de ces effets que l'élémentaire joint universel de Hooke qui, à la manière d'un cardan, autorise la transmission des moments de rotation autour de deux axes convergents.

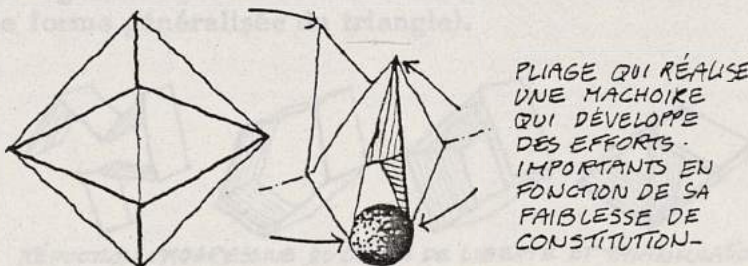


C'est la déformation d'un système mécanique sous l'effet d'une sollicitation qui indique le travail qu'effectuerait un élément de liaison supplémentaire. C'est par le jeu de cette mécanique que s'explique aussi un des aspects de la perpendicularité/dualité/complémentarité des contraintes de /traction/compression au sein même de la matière, ainsi que certains de ses comportements de déformation élastique, tel que le phénomène de Poisson.



Le pliage est aussi le siège du développement de moments (de flexion) importants en fonction de l'effet élémentaire de bras de levier qu'exercent les faces et les plis.

Voici un modèle illustrant la conjugaison de moments à effets démultipliateurs, réalisant une "machine" élémentaire.

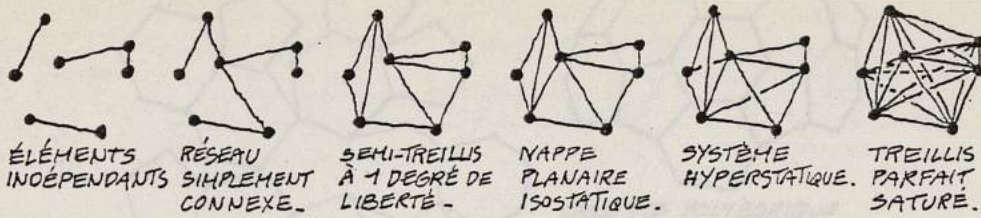


2 STATIQUE

2.1 L'essence relationnelle des structures

C'est la façon la plus profonde de comprendre la structuration (constructive) comme un jeu de relations entre des éléments formant un tout. Moins il y a de relations, plus il y a de liberté, et à l'extrême limite, indépendance totale et amorphie. Plus

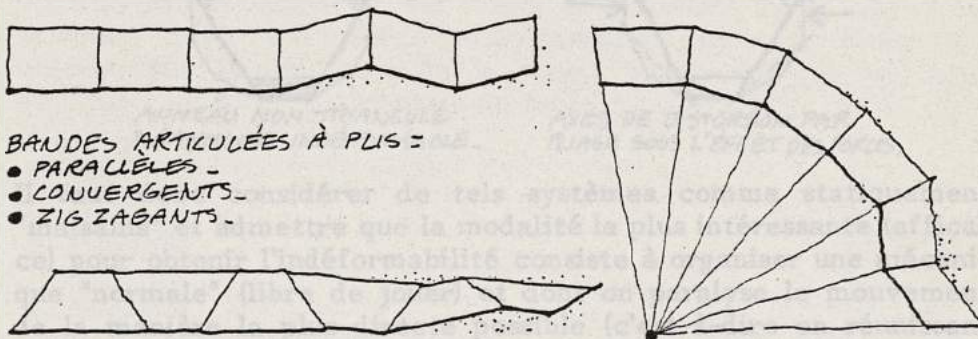
il y a de relations, plus la structuration est effective, jusqu'à un niveau de saturation qu'on ne peut dépasser, et qui tendrait à rejoindre la puissance du continu.



C'est ainsi qu'il convient de comprendre la stabilité des constructions, comme un système mécanique plus ou moins riche de relations proposant une vaste combinatoire de solutions différentes en nature, en nombre ou en position, et donc plus ou moins efficaces. C'est au sein même de cette variété de possibilités que trouvent à s'exercer les diverses stratégies de composition structurale, et c'est le recours à la spatialité qui marque un passage qualitativement décisif. L'aspect mécanique a déjà été traité. Envisageons-en l'aspect statique selon l'optique ci évoquée.

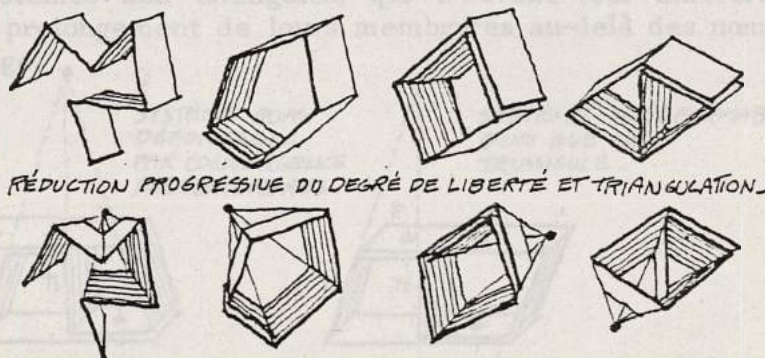
2.2 Paralysie des systèmes mécaniques

En manipulant les diverses chaînes plissées ci-dessous, on réalise divers circuits dont on abaisse progressivement le degré de liberté pour obtenir des constructions indéformables.



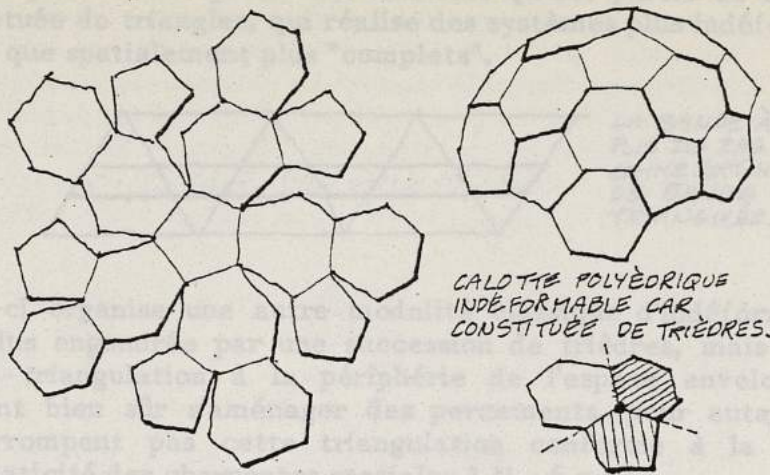
Comparons les résultats obtenus par chacun des systèmes.

On constate, avec les deux premières bandes à plis parallèles ou convergents que le critère d'indéformabilité est le trièdre (comme forme généralisée du triangle).

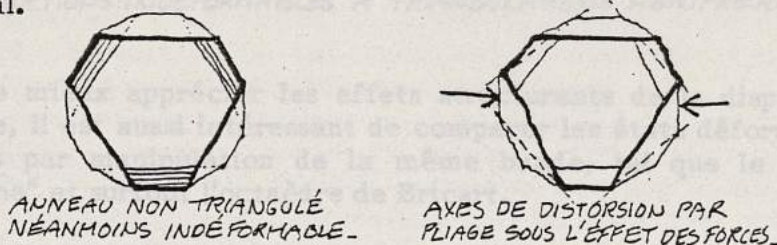


On déduit que l'on peut de la sorte composer par une succession de trièdres qui ne seraient pas uniquement constitués de triangles,

et selon des incidences ternaires aux nœuds (disposition minimale relativement aux assemblages de "plaques").

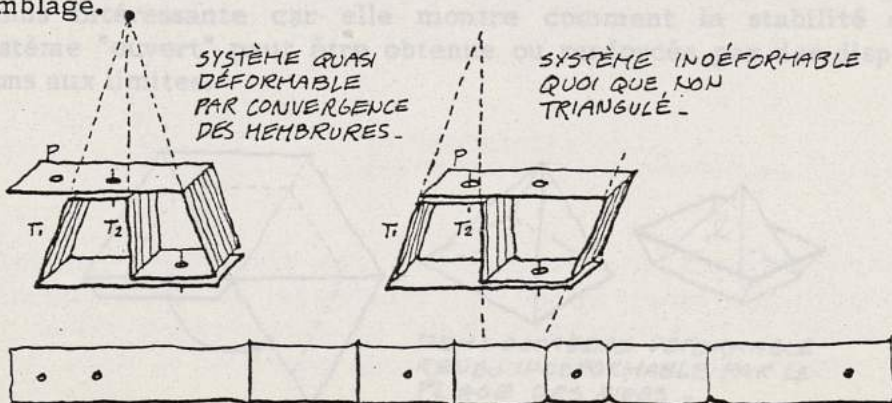


Les chaînes à plis en zig zag engendrent des circuits indéformables bien que non triangulés (Ceci est dû à l'incompatibilité d'articulation des axes de rotation). Or une sollicitation latérale de l'objet annulaire engendré amène les axes ainsi que les plaques à travailler en torsion - c'est-à-dire les pousse à évoluer en dehors d'eux-mêmes - alors qu'une plaque mince n'est idéalement propice qu'à un travail au long d'elle-même, et une charnière qu'à un jeu axial.

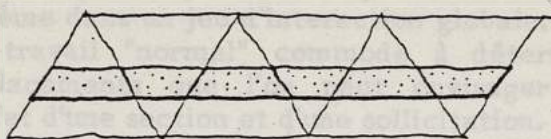


Il faut donc considérer de tels systèmes comme statiquement "malsains" et admettre que la modalité la plus intéressante (efficace) pour obtenir l'indéformabilité consiste à organiser une mécanique "normale" (libre de jouer) et dont on paralyse le mouvement de la manière la plus directe possible (c'est-à-dire en réunissant les emplacements qui présentent la plus importante propension au déplacement).

C'est ainsi que dans le système articulé ci-dessous on peut apprécier comment les diverses positions de la patte P empêchent plus ou moins le mouvement relatif des tiges T1 et T2 (il s'agit là d'une généralisation du principe de triangulation étendu à des systèmes non triangulés, qui trouvent leur indéformabilité par le prolongement de leurs membrures au-delà des nœuds d'assemblage).

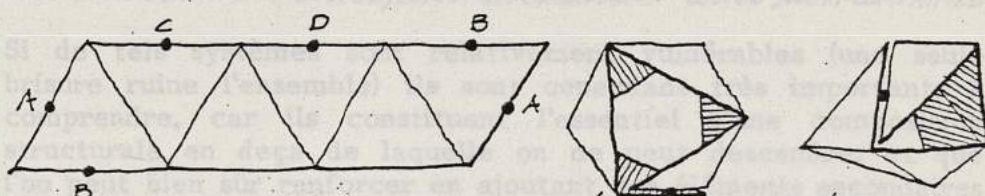


Les états d'indéformabilité de la chaîne à plis alternés s'expliquent encore par le fait qu'elle ne constitue qu'une partie de la chaîne constituée de triangles, qui réalise des systèmes plus indéformables parce que spatialement plus "complets".



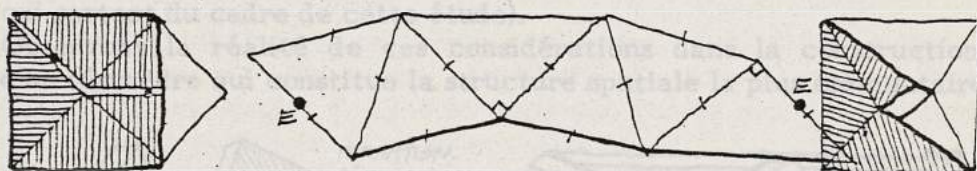
LA BANDE À PLUS ZIG ZAG COMME PORTION DE BANDE TRIANGULÉE.

Celle-ci organise une autre modalité classique d'indéformabilité, non plus engendrée par une succession de trièdres, mais par une totale triangulation à la périphérie de l'espace enveloppé (où peuvent bien sûr s'aménager des percements, pour autant qu'ils n'interrompent pas cette triangulation conforme à la formule d'isostaticité des charpentes spatiales $3N - 6 = B$)



CONSTRUCTIONS INDÉFORMABLES À TRIANGULATIONS PÉRIPHÉRIQUES -

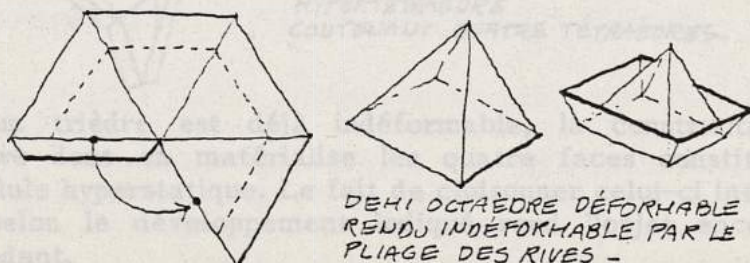
Afin de mieux apprécier les effets structurants de la disposition spatiale, il est aussi intéressant de comparer les états déformables obtenus par manipulation de la même bande, tel que le "sabot de Gykha" et surtout l'octaèdre de Bricart.



"SABOT" DE GYKHA (RÉUNION A.B ET C.D) DÉFORMABLE CAR PARTIELLEMENT TRIANGULÉ À LA PÉRIPHÉRIE -

OCTAÈDRE DÉFORMABLE DE BRICART (RÉUNION E.E)

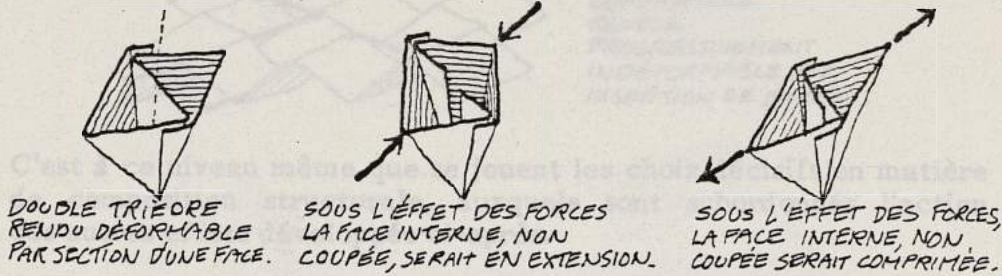
Les modèles qui précèdent seront utilement comparés à un demi octaèdre (déformable) dont le "retournement" par pliage de la bordure limitrophe engendre une configuration indéformable quoi que non triangulée, ce qui ramène aux états "malsains" analysés plus haut. Cette dernière modalité d'indéformabilité est néanmoins intéressante car elle montre comment la stabilité d'un système "ouvert" peut être obtenue ou renforcée par des dispositions aux limites.



DEMI OCTAÈDRE DÉFORMABLE RENDU INDÉFORMABLE PAR LE PLIAGE DES RIVES -

2.3 De l'isostaticité à l'hyperstaticité

Les constructions étudiées précédemment sont en état d'isostaticité, c'est-à-dire qu'elles ne possèdent que les relations nécessaires et suffisantes pour assurer l'indéformabilité. Elles sont le siège d'une mécanique simple, où chaque élément est sollicité au long de lui-même dans un jeu d'interaction globale. Chaque face accomplit un travail "normal" commode à déterminer grâce au jeu des déplacements que l'on peut envisager expérimentalement sous l'effet d'une section et d'une sollicitation.

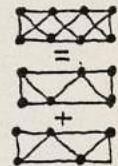


Si de tels systèmes sont relativement vulnérables (une seule brisure ruine l'ensemble) ils sont cependant très importants à comprendre, car ils constituent l'essentiel d'une composition structurale en deça de laquelle on ne peut descendre, et que l'on peut bien sûr renforcer en ajoutant des éléments secondaires qui rendent alors la construction hyperstatique.

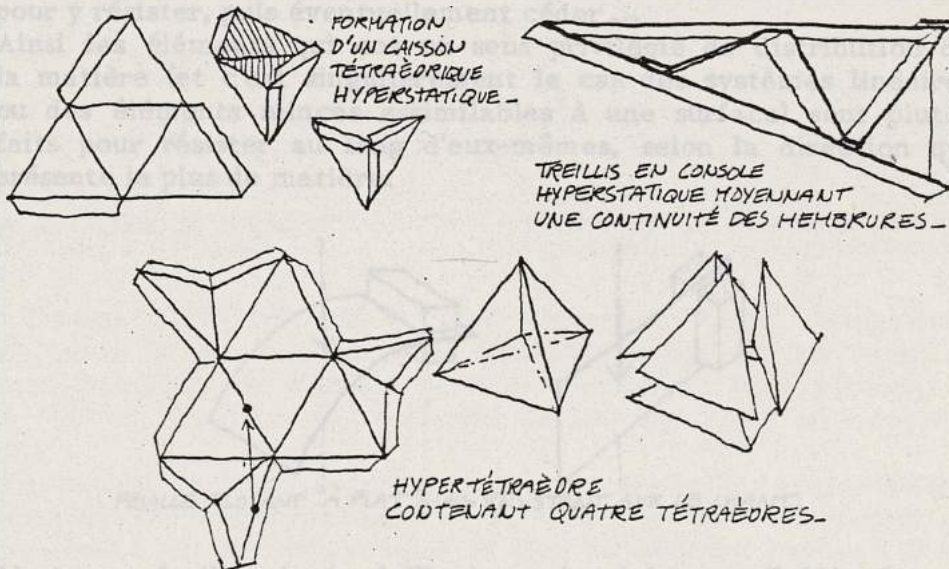
Symétriquement à la notion de degré de liberté apparaît celle de degré d'hyperstaticité, qui correspond au surnombre d'éléments par rapport au système isostatique intermédiaire.

Les constructions hyperstatiques sont le siège d'un travail composite et diffus (comment parler en effet du travail d'un élément "superflu" ? On accède à cette compréhension par la superposition de plusieurs sous-états isostatiques, et selon d'autres modalités qui sortent du cadre de cette étude).

Observons la réalité de ces considérations dans la construction d'un tétraèdre qui constitue la structure spatiale la plus élémentaire.

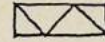


TREILLIS
HYPERSTATIQUE
COMME
SUPERPOSITION
DE SYSTÈMES
ISOSTATIQUES.

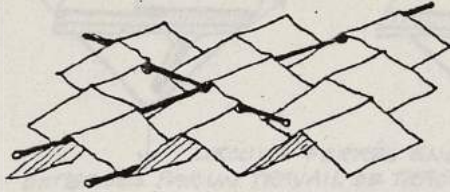


Puisqu'un trièdre est déjà indéformable, la construction d'un tétraèdre dont on matérialise les quatre faces constitue déjà une cellule hyperstatique. Le fait de cloisonner celui-ci intérieurement selon le développement indiqué rend l'objet encore plus surabondant.

Cette façon de procéder participe de la même logique qui consiste à trianguler un triangle déjà indéformable, amenant à envisager plusieurs niveaux de structuration éventuellement autonomes. Il est édifiant, à la lumière des considérations qui précèdent, de consolider progressivement des systèmes déformables en observant à chaque stade le rôle des dispositions adoptées.



TRIANGULATION
D'UN SYSTÈME
DÉJÀ TRIANGULÉ
POUR RÉDUIRE
LE FLAMBAGE.



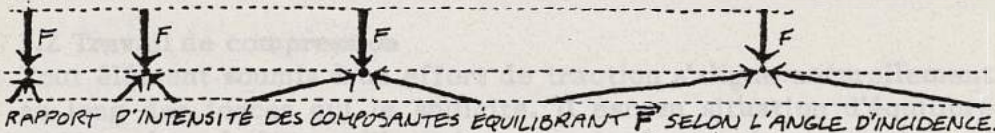
NAPPE À CHEVRONS
DÉFORMABLE
RENDUE
PROGRESSIVEMENT
INDÉFORMABLE PAR
INSERTION DE BARRES.

C'est à ce niveau même que se jouent les choix décisifs en matière de composition structurale, auxquels sont subordonnés l'action des autres effets développés ci-après.

3 INERTIE

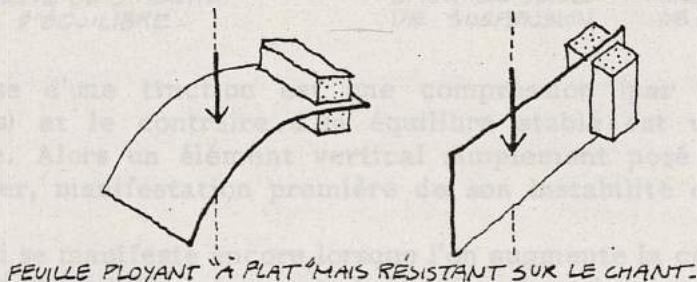
3.1 Disposition de résistance de la matière

C'est en s'opposant le plus directement à l'action d'une force que les efforts à développer pour y résister sont les plus faibles.



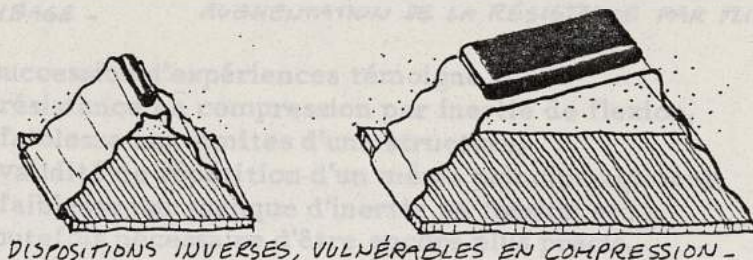
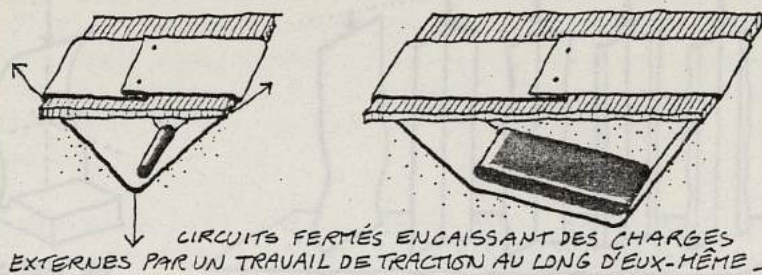
Et puisque les forces se composent entre elles, il est naturel que la matière, elle-même constituée de forces en équilibre plus ou moins stable, s'aligne au long des forces qui la sollicitent pour y résister, puis éventuellement céder ...

Ainsi les éléments qui ont un sens privilégié de distribution de la matière (et c'est singulièrement le cas des systèmes linéaires ou des éléments minces assimilables à une surface) sont plutôt faits pour résister au long d'eux-mêmes, selon la direction qui présente le plus de matière.



Ainsi, une feuille placée à l'horizontale ploie sous l'effet de son propre poids dirigé verticalement (sa variation de courbure indique le rapport d'intensité des efforts). Elle résiste mieux si on la dispose sur la tranche, dans le plan même de l'action des charges. Et c'est de toutes les manières par un travail au long de soi qu'un élément mince encaisse une force dirigée en dehors de lui-même.

En tant qu'élément mince, le dispositif est cependant plus efficace en situation de traction (cas d'équilibre stable, associatif) qu'en situation de compression (cas d'équilibre inverse, instable, dissociatif).

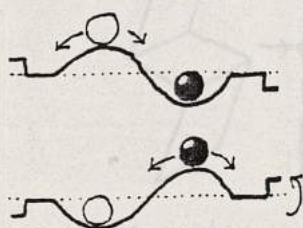


Tel est schématiquement le principe universel d'inertie (opposition qu'exerce la matière à toute modification de son état) et qui fait qu'un élément résiste d'autant mieux à une sollicitation qu'on l'y dispose selon la direction où il présente le maximum de matière.

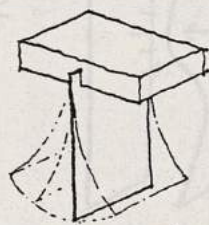
3.2 Travail de compression

Tout élément soumis à un effort de traction s'aligne naturellement au long des forces qui le sollicite. Il est en situation d'équilibre stable, c'est à dire qu'il revient spontanément à sa position de départ quand on l'en éloigne.

Son aptitude à résister ne dépend pas de sa longueur.



RÉVERSIBILITÉ DE STABILITÉ DES ÉTATS D'ÉQUILIBRE -



SITUATION STABLE DE SUSPENSION.



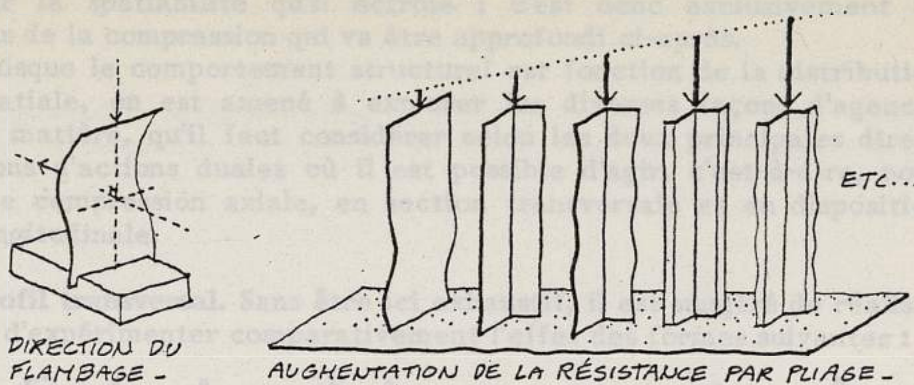
SITUATION INSTABLE DE COMPRESSION -

L'inverse d'une traction est une compression (par changement de sens) et le contraire d'un équilibre stable est un équilibre instable. Alors un élément vertical simplement posé a tendance à tomber, manifestation première de son instabilité en compression.

Celle-ci se manifeste encore lorsque l'on augmente la compression : apparaît perpendiculairement à la direction de compression un ploiement qui s'effectue selon le sens de moindre inertie ; c'est le phénomène de "flambage", qui est en fait une rupture en flexion à l'emplacement où le moment de flexion est maximum.

Alors le pli, qui permet une orientation de la matière selon n'importe quelle direction procure un accroissement de résistance à une pièce en compression. Et plus il y a de plis plus il y a de résistance ... Mais selon quelle direction faire des plis ? En s'oppo-

sant le plus directement possible aux directions de déformation qu'indique clairement le ploiment ...



Cette succession d'expériences témoigne :

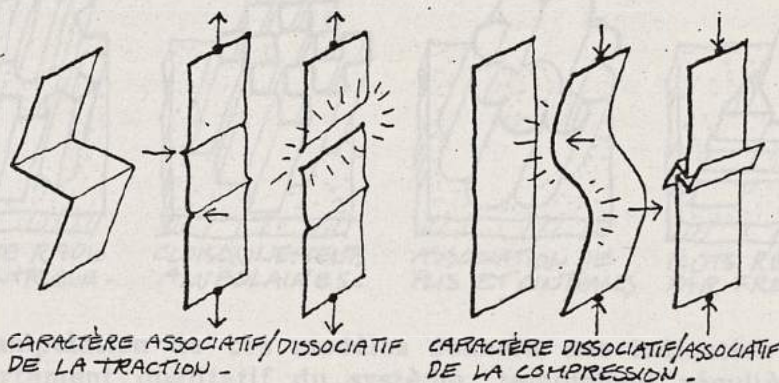
- de la résistance en compression par inertie de flexion,
- de la faiblesse aux limites d'une structure,
- de la validité de répétition d'un même principe agissant,
- de la faiblesse par manque d'inertie en torsion etc...

Il est toutefois nécessaire d'être encore plus précis.

La traction est un état de contrainte dont la manière d'être est à la fois associative et dissociative et, par dualité, (une chose n'allant pas sans son contraire), la compression est l'inverse, à la fois dissociative et associative.

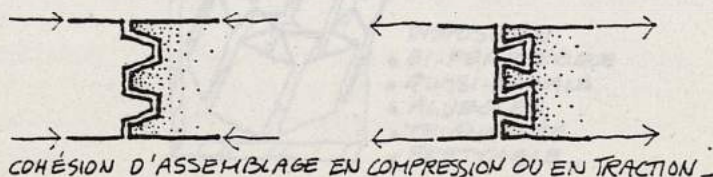
La traction est associative en ce que son support s'aligne, se rassemble au long de la ligne d'action... jusqu'à rupture dissociative qui éloigne les éléments.

La compression est dissociative en ce que son support s'éloigne de la ligne d'action, et associative en ce qu'elle a tendance à réunir des éléments disjoints.



Il est très important de tenir compte de ces tendances naturelles :

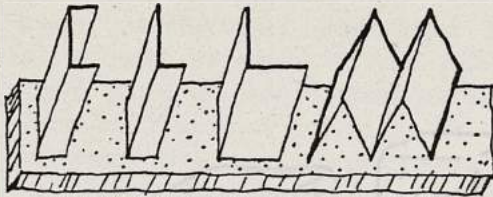
- Dans la composition spatiale globale de tout système qui articule directement des efforts de traction et de compression.
- En toute forme de résistance à des contraintes composites (genre flexion) qui conjugue en fait ces deux états de travail élémentaire indissociables.
- Dans les modalités d'assemblage, fuyantes en traction (quoiqu'associatives ...) et blocantes en compression (quoiqu'dissociatives...)



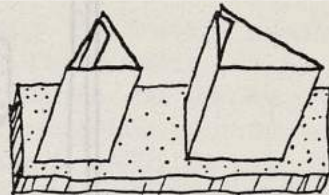
Alors que le pli n'a guère d'effet consolidateur pour la traction - qui tend au déploiement, il est très efficace en compression par la spatiabilité qu'il octroie ; c'est donc exclusivement ce cas de la compression qui va être approfondi ci-après.

Puisque le comportement structural est fonction de la distribution spatiale, on est amené à explorer les diverses façons d'agencer la matière, qu'il faut considérer selon les deux principales directions d'actions duales où il est possible d'agir, c'est-à-dire, pour une compression axiale, en section transversale et en disposition longitudinale.

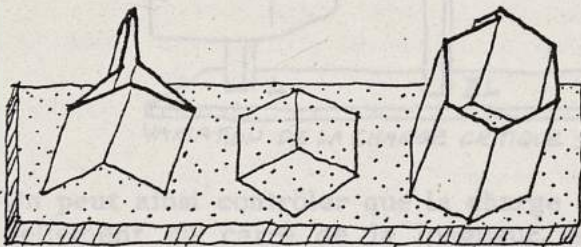
Profil transversal. Sans être ici exhaustif, il est suggéré de réaliser et d'expérimenter comparativement l'effet des formes suivantes :



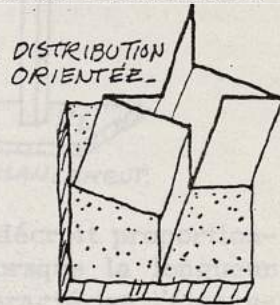
LIGNES "OUVERTES" SELON DIVERSES FORMES DE PROFILÉS -



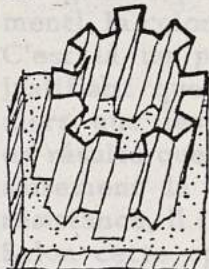
CIRCUITS FERMÉS, SYMÉTRIQUES OU ASYMÉTRIQUES



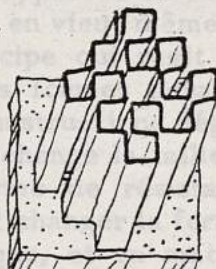
SYSTÈME RADIAL OU BIEN PÉRIPHÉRIQUE -



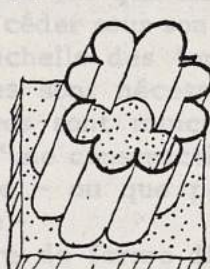
DISTRIBUTION ORIENTÉE -



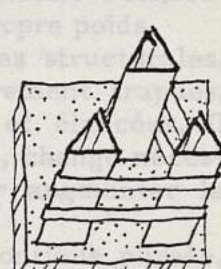
SYSTÈME RADIO CONCENTRIQUE -



CLOISONNEMENTS ALVÉOLAIRES -



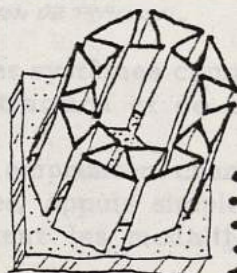
ASSOCIATION DE PLS ET CINTRAGES



ILOTS RÉUNIS PAR FRETTAGE

La manipulation de ces modèles donnera une indication sur le comportement qualitatif du système, témoignant régulièrement de faiblesse selon la direction de moindre inertie.

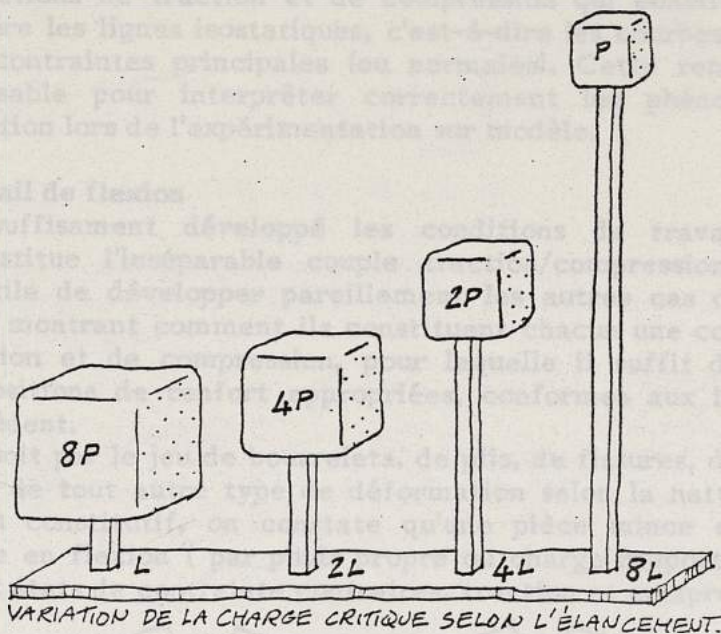
Et dans tous les cas, la rupture apparaîtra en compression, par brisure en flexion, ceci amenant finalement à composer un "poteau" selon un jeu de parois les plus antagonistes possibles, susceptibles de travailler simultanément en traction et en compression.



DISPOSITION
 • BI-PÉRIPHÉRIQUE
 • QUASI-RADIALE
 • ALVÉOLÉE
 • TRIANGULÉE
 • FRETTABLE...

L'expérimentation de ces modèles, permet aussi d'effectuer des comparaisons quantitatives significatives, à condition d'établir des modalités d'appréciation similaires : même hauteur, même quantité de matériaux, section identique, même nature d'appuis ...

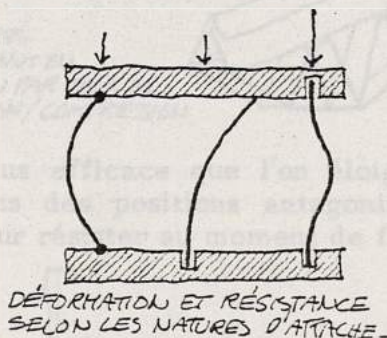
Dispositions longitudinales. Lorsque l'on charge progressivement une colonne, elle finit par céder lorsqu'on atteint la charge critique P .



On peut ainsi contrôler que la charge critique décroît proportionnellement au carré de la longueur, et que lorsque la longueur est grande par rapport à la section (ce qui caractérise l'élançement), la colonne en vient même à céder sous son propre poids.

C'est là un principe qui régit l'échelle des formes structurales, justifiant que les formes pesantes sont nécessairement trapues, alors que les constructions légères sont minces et élancées. Il en résulte que si change la taille d'une construction, change nécessairement la forme de résistance - ou que pour augmenter la résistance, il faut changer la forme -

Selon cette optique, et en matière de forme discontinue plissée, il convient de donner à une "barre" la forme naturelle de déformation par flambage.



Cela donne lieu à des systèmes composites, selon diverses stratégies de composition de traction et de compression, qui vont régulièrement ensembles.

Les dispositions à emprunter changent bien sûr selon la nature des attaches (rotules, appuis simples ou encastremets) qui modifie considérablement les modalités de travail, donc les formes de résistance.

Dans tous les cas, les situations critiques sont à considérer à deux niveaux :

- Celui du flambage général du système, lorsque l'élanement global devient trop important.
- Celui du flambage local, lié à l'épaisseur même du matériau.

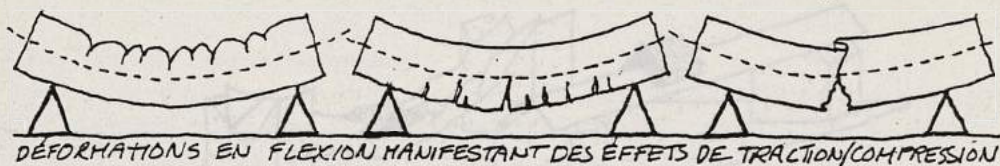
Notons enfin que pour toute surface où apparaissent des rides plissées sous l'effet d'une contrainte, celles-ci indiquent à la fois les directions de traction et de compression qui constituent dans la matière les lignes isostatiques, c'est-à-dire les courbes funiculaires de contraintes principales (ou normales). Cette remarque est indispensable pour interpréter correctement les phénomènes de déformation lors de l'expérimentation sur modèle.



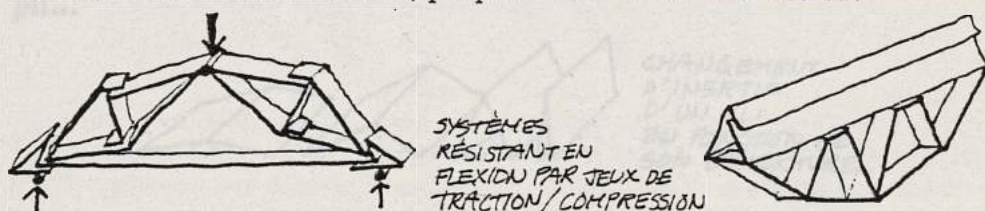
3.3 Travail de flexion

Ayant suffisamment développé les conditions de travail normal que constitue l'inséparable couple traction/compression, il n'est guère utile de développer pareillement les autres cas de travail, sinon en montrant comment ils constituent chacun une combinaison de traction et de compression, pour laquelle il suffit de prendre les dispositions de renfort appropriées, conformes aux indications qui précèdent.

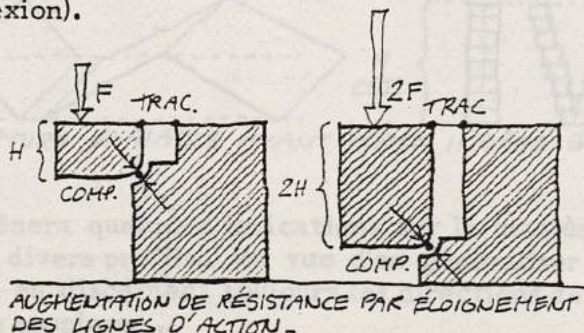
Que ce soit par le jeu de bourrelets, de plis, de fissures, de déchirures - ou de tout autre type de déformation selon la nature de son matériau constitutif, on constate qu'une pièce mince ou épaisse sollicitée en flexion (par poids propre ou charge rapportée) conjugue deux états de contrainte contraires, traction et compression.



En cheminant d'une zone où il y a compression pour aller dans celle où il y a traction, on passe nécessairement par un emplacement où la matière n'est pas sollicitée, la fibre neutre, lieu où l'on peut donc effectuer des percements ou bien disposer peu de matière, afin de réunir une pièce "épaisse" appropriée au travail de compression, avec un élément mince, propice au travail de traction.



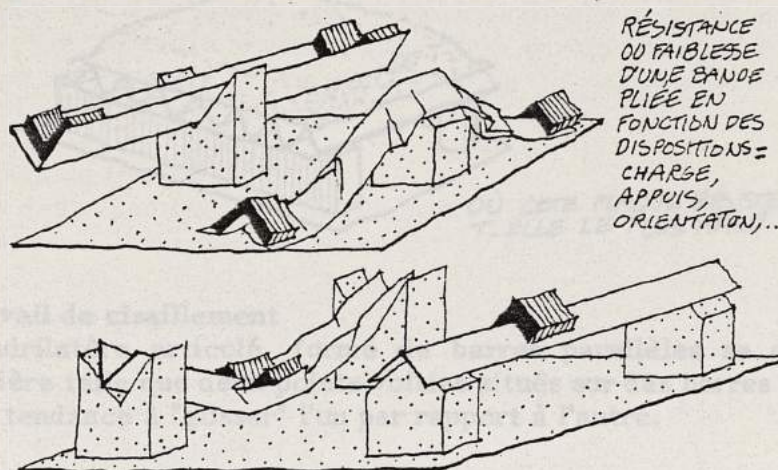
Cette composition est d'autant plus efficace que l'on éloigne le plus possible chaque système dans des positions antagonistes : leur distance fait bras de levier pour résister au moment de flexion (inertie de flexion).



On procure plus simplement cette inertie de flexion à une surface en la ployant pour rapprocher la matière de la direction des forces agissantes. Ce sont encore là les mêmes considérations qui expliquent l'efficacité du plissement dans les diverses positions de cette simple bande, résistante selon que son bord libre (non spatialisé par pliage) est en situation de traction, et que le dièdre du pli (spatial) est en position de compression.



Les diverses combinaisons envisagées ici montrent encore l'importance déterminante des points d'appui et donc des modalités d'application des charges.

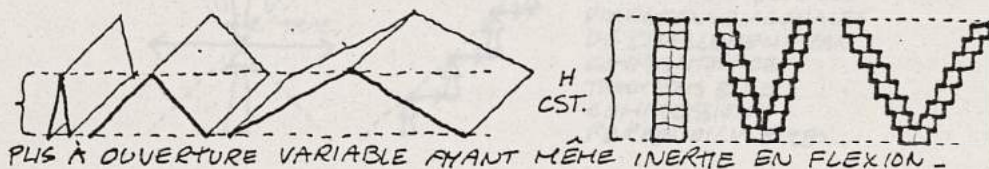


Pour mieux apprécier les effets consolidateurs du plissement, il est intéressant :

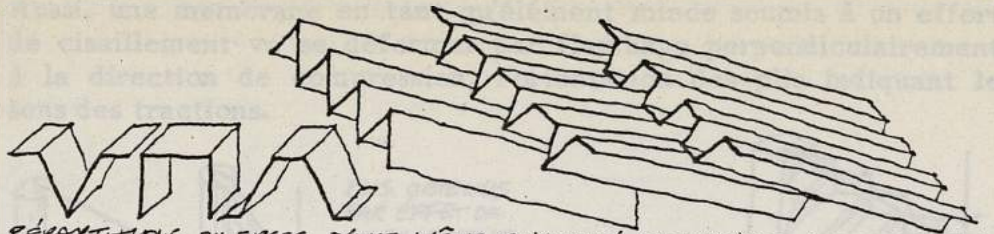
- de comparer ce que donnent les diverses ouvertures d'un même pli...



- de comparer si des plissements qui ont une même inertie (et donc théoriquement même résistance) se comportent pareillement...

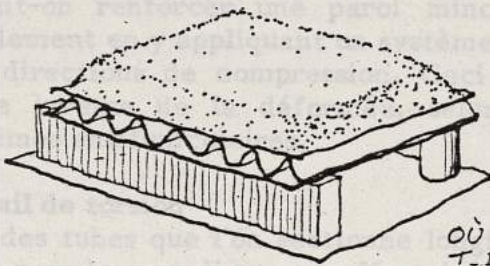


- ce qui amènera quelques indications sur la manière de multiplier les plis selon divers profils... en vue d'en généraliser les effets sur des "dalles", en discernant toujours les directions de résistance des directions de souplesse...



RÉPARTITIONS DIVERSES D'UNE MÊME QUANTITÉ DE MATIÈRE SUR DES PROFILS DE MÊME "HAUTEUR" OCCASIONNANT DES OBJETS À COMPORTEMENT VARIABLE.

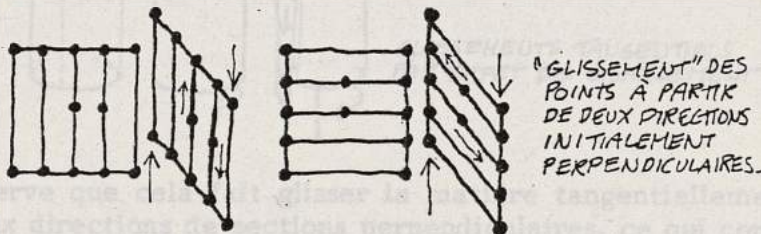
Ces variations élémentaires permettent de comprendre la logique constitutive et la résistance de systèmes déjà relativement élaborés : Comparer par exemple les comportements en flexion d'une plaque carrée en carton ondulé simple, reposant respectivement sur quatre côtés, deux côtés, quatre points d'appui, deux points d'appui, un seul point d'appui.



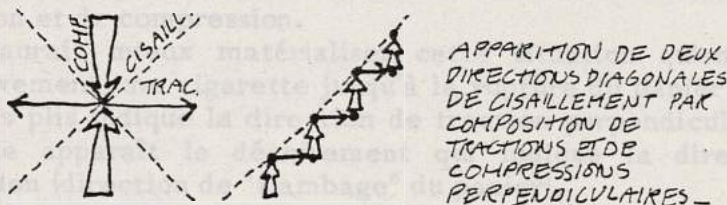
OÙ CETTE PLAQUE RÉSISTE-T-ELLE LE PLUS MAL ?

3.4 Travail de cisaillement

Un quadrilatère articulé, formé de barres parallèles se déforme de manière telle que deux points voisins situés sur des barres distinctes ont tendance à "glisser" l'un par rapport à l'autre.

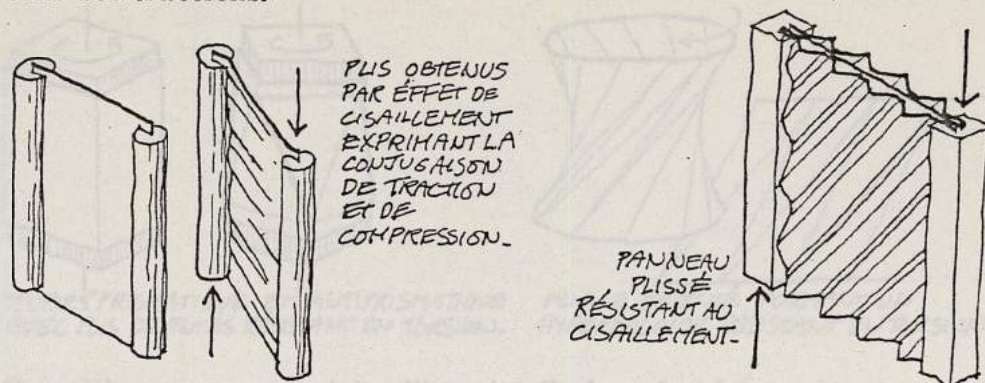


C'est là une manière imagée de montrer qu'il existe en un matériau continu deux directions perpendiculaires selon lesquelles la matière tend à glisser sur elle-même ; on dit alors que la matière est soumise à des contraintes de cisaillement selon ces directions.



Une autre façon plus théorique consiste à considérer que la conjugaison de deux directions perpendiculaires de contraintes normales de traction et de compression se composent selon deux directions diagonales et perpendiculaires où la matière est soumise à des efforts tangentiels.

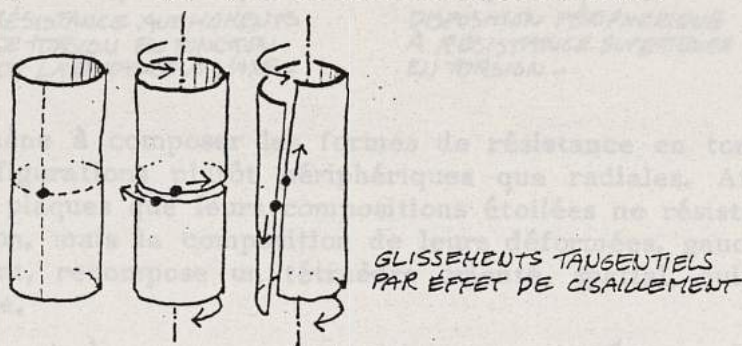
Aussi, une membrane en tant qu'élément mince soumis à un effort de cisaillement va se déformer par flambage perpendiculairement à la direction de compression, l'orientation des plis indiquant le sens des tractions.



Ainsi sait-on renforcer une paroi mince soumise à des efforts de cisaillement en y appliquant un système de plis diagonaux parallèles aux directions de compression. Ceci revient encore à utiliser la forme inverse de la déformée, selon le principe d'efficacité des systèmes antifuniculaires.

3.5 Travail de torsion

Prenons des tubes que l'on sectionne longitudinalement et transversalement pour leur appliquer un effort de torsion axial.



On observe que cela fait glisser la matière tangentiellement selon ces deux directions de sections perpendiculaires, ce qui correspond, comme précédemment à des contraintes de cisaillement. (On réalise d'ailleurs l'importance de ce travail de cisaillement pour la résistance d'un objet si l'on considère la très faible résistance du tube coupé longitudinalement...)

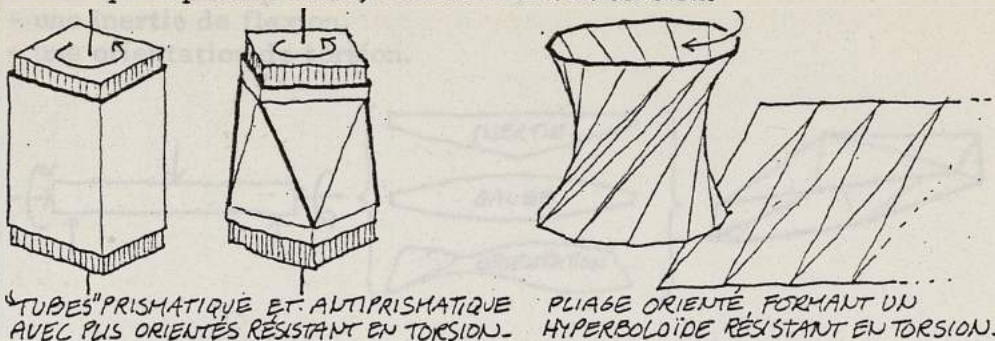
Puisqu'il y a cisaillement, il existe deux directions diagonales perpendiculaires entre elles où s'exercent des contraintes normales de traction et de compression.

On ne saurait mieux matérialiser cette situation qu'en tordant progressivement une cigarette jusqu'à la rupture du papier : l'orientation des plis indique la direction de traction perpendiculairement à laquelle apparaît le déchirement qui indique la direction de compression (direction de "flambage" du papier).



RUPTURE DE
TRACTION ET
PLUS DE
COMPRESSION
DANS UNE
TORSION.

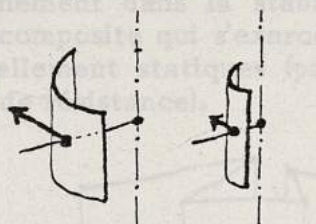
Ce sont donc les configurations orientées inverses, où les plis sont disposés selon la direction de compression qui constituent les formes de résistance par pliage. Aussi, cet antiprisme carré, mieux qu'un prisme droit, résiste-t-il à la torsion.



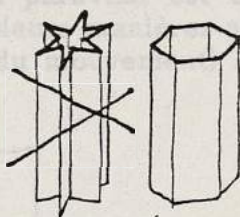
"TUBES" PRISMATIQUE ET ANTIPRISMATIQUE AVEC PLS ORIENTÉS RÉSISTANT EN TORSION.

PLIAGE ORIENTÉ, FORMANT UN HYPERBOLOÏDE RÉSISTANT EN TORSION.

Par ailleurs, et par raison d'inertie, il n'y a de résistance en torsion que s'il existe quelque matière, éloignée de l'axe de torsion, qui soit amenée à travailler au long d'elle-même. Et la résistance est d'autant plus importante que la distance est grande.

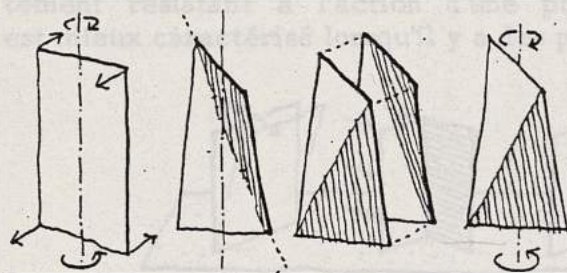


RÉSISTANCE AUX MOMENTS DE TORSION EN FONCTION DE LA DISTANCE À L'AXE -

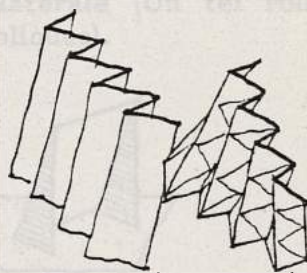


DISPOSITION PÉRIPHÉRIQUE À RÉSISTANCE SUPÉRIEURE EN TORSION -

Ceci amène à composer les formes de résistance en torsion par des configurations plutôt périphériques que radiales. Ainsi, pas plus les plaques que leurs compositions étoilées ne résistent-elles en torsion, mais la composition de leurs déformées, gauchies par plissement, recompose un tétraèdre orienté, spatial, qui devient résistante.



DEUX PLAQUES VOILÉES EN TORSION RECOMPOSENT UN TÉTRAÈDRE RÉSISTANT.



VOILEMENT D'UN ACCORDÉON PAR MICRO-PLISSEMENTS.

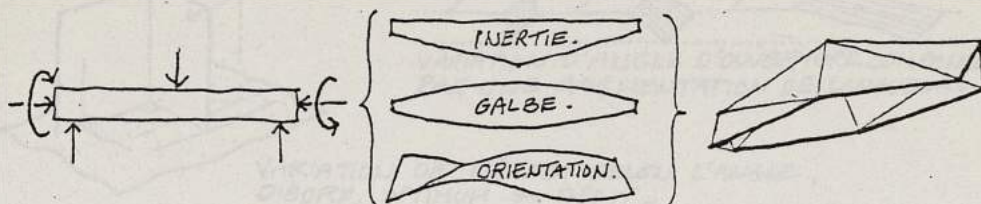
Comment, selon tous ces préceptes, faire résister un "accordéon" qu'un moindre effort de torsion fait voiler ? (observer la formation des plis secondaires ...)

3.6 Travail composite

Une même construction est en général sollicitée simultanément ou successivement de plusieurs façons différentes, sous l'effet de charges fixes ou changeantes, et doivent pouvoir travailler en fait de manière très composite. Aussi, faut-il envisager l'ensemble des sollicitations possibles et ajuster au système construit les formes de résistance précitées.

Les types de travail étudiés suffisent à traiter tous les autres : ainsi une pièce simultanément soumise à une compression, une flexion et une torsion nécessite-t-elle conjointement :

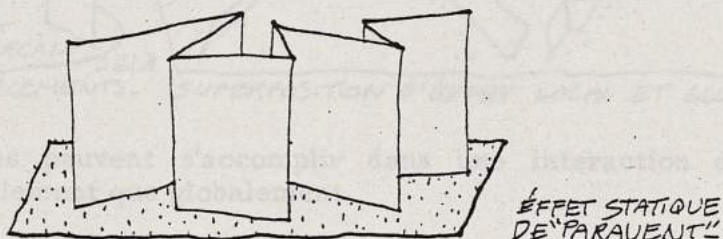
- une spatialisation centrée de compression,
- une inertie de flexion,
- une orientation de torsion.



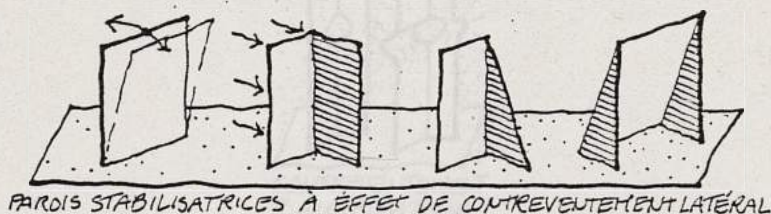
4 REFEND

4.1 Stabilisation par spatialisation

L'effet structurant caractéristique du pliage que l'on peut observer communément dans la stabilité d'un paravent est en réalité une action composite qui s'exerce de plusieurs manières assez parentes, essentiellement statiques (paralysie du mouvement) et dynamiques (forme de résistance).



Tel un étiayement, une face du dièdre empêche l'autre face de tomber latéralement sous le simple effet de son instabilité naturelle en compression. Ceci s'apparente encore à un effet de contreventement résistant à l'action d'une poussée latérale (Un tel rôle est mieux caractérisé lorsqu'il y a des parois obliques).



L'action de chaque paroi est réciproque : le rôle de l'une vis-à-vis de l'autre est semblable à celui de cette dernière vis-à-vis de la première. Ces actions s'exercent d'autant mieux que les parois sont plus longues.

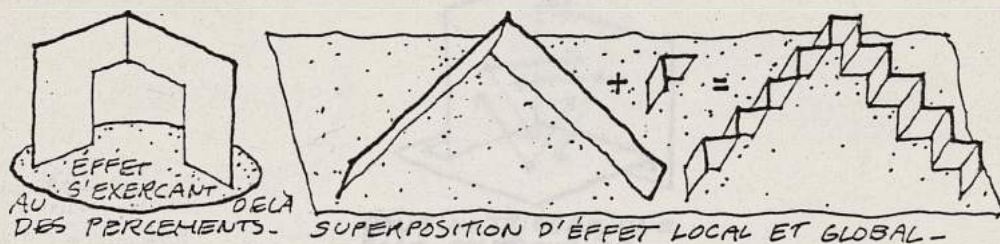


A des longueurs de parois données, ce jeu est d'autant plus efficace que l'angle dièdre est plus proche de l'angle droit (c'est-à-dire perpendiculaire aux directions de mouvement des charnières virtuelles que constituent les appuis linéaires au sol). Il s'agit là encore de disposer la matière selon la direction d'action des forces.



Qu'il s'agisse de parois ancrées, articulées, ou simplement posées au sol, leur comportement participe de l'efficacité statique du trièdre (unité spatiale indéformable).

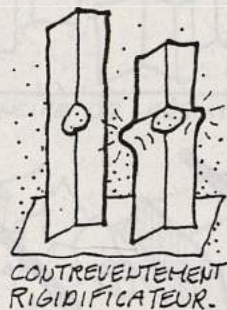
Cet effet peut aussi s'exercer à distance sur des éléments percés.



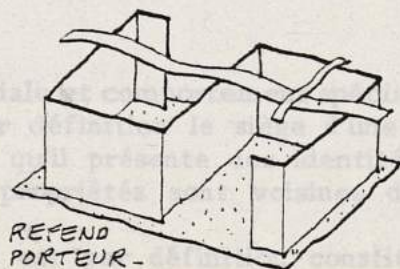
Ces rôles peuvent s'accomplir dans une interaction de parois, tant localement que globalement.

4.2 Rigidification par cloisonnement

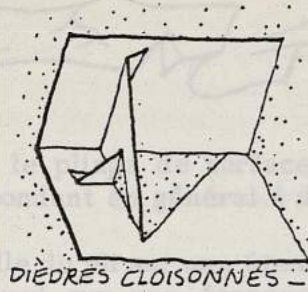
A ces actions se superpose bien entendu un effet de paroi d'inertie raidissant le pli en empêchant les déformations de flexion (celles qui surviennent par exemple dans le flambage d'un pli soumis à une compression axiale).



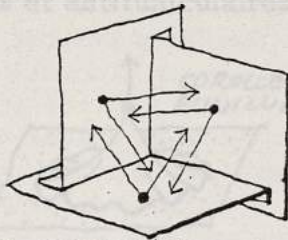
La répétition de ces dispositions peut, tels des éléments de refend, procurer des supports intermédiaires qui diminuent la portée des éléments franchisseurs.



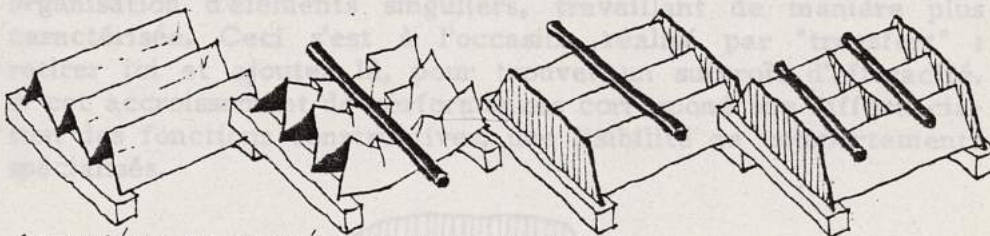
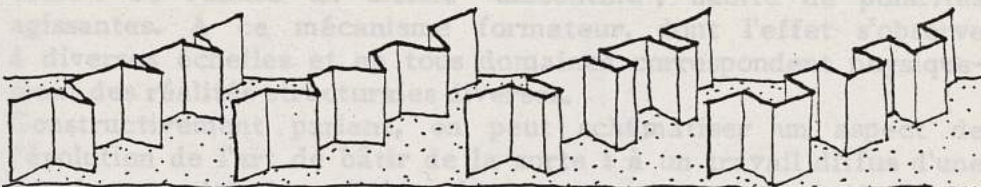
Ces effets, qui n'ont été considérés qu'en rapport avec la direction privilégiée de la verticale peuvent être étendus au multidirectionnel, en vue d'aménager des cloisons raidissantes selon toutes les directions utiles.



C'est en fonction de ces considérations qu'il faut apprécier le rôle structural fondamental du trièdre en toute composition constructive par "plaques" comme les systèmes plissés. (Chaque paroi exerce ses effets vis-à-vis des deux autres).



Confirmer l'effet de ces données en effectuant des variations et en expérimentant les jeux de parois suivantes (stabilité latérale, résistance à la compression, résistance à la flexion).



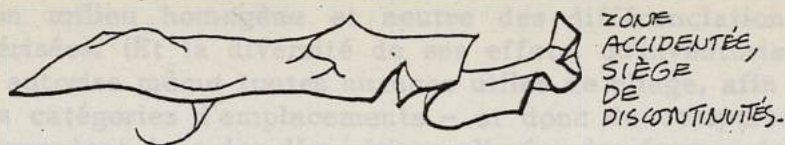
5 POLARITE

5.1 Singularité spatiale et comportement spécial

Le continu est par définition le siège d'une certaine régularité de comportement, qu'il présente des identités ou des variations de situation, ses propriétés sont voisines d'un emplacement à un autre.

Le discontinu, qui est par définition constitué de ruptures, de

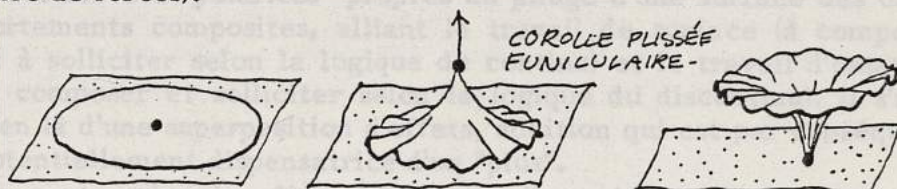
singularités, présente des différences de comportement importantes en ces lieux de soudaine variation (cf. théorie des catastrophes).



Pour ce qui concerne le pliage de surfaces, ces singularités sont de deux types, correspondant en général à deux niveaux de particularisation :

- ligne unidimensionnelle du pli sur une étendue bidimensionnelle
- point zéro-dimensionnel sur une étendue unidimensionnelle (pli de pli).

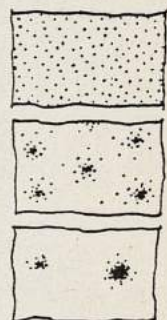
L'effet de ces singularités ponctuelles ou linéaires est particulièrement intéressant à envisager lorsqu'il apparaît à l'occasion d'un processus naturel de sculpturation de la forme par des forces, naturellement gage d'efficacité en vertu du principe structurant des systèmes funiculaires et antifuniculaires (états inverses d'équilibre de forces).



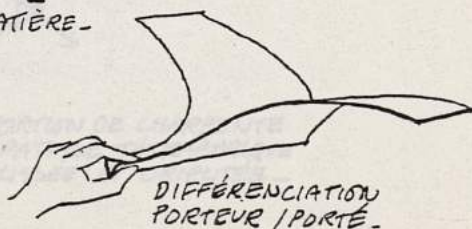
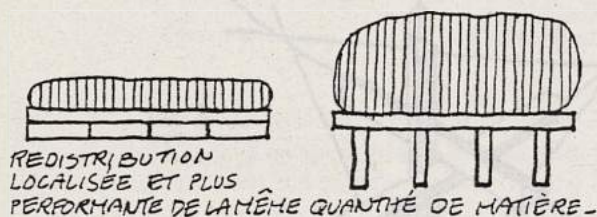
5.2 Caractérisation des fonctions constructives

Par ailleurs, dans l'univers des formes, des cohérences persistantes se constituent, par "convergences" résultant de l'action "d'attracteurs". Se réalise un monde "discontinu", habité de polarités agissantes. A ce mécanisme formateur, dont l'effet s'observe à diverses échelles et en tous domaines correspondent physiquement des réalités structurales diverses.

Constructivement parlant, on peut schématiser un aspect de l'évolution de l'art de bâtir de la sorte : à un travail diffus d'une grande quantité de matière s'est progressivement substitué une organisation d'éléments singuliers, travaillant de manière plus caractérisée. Ceci s'est à l'occasion réalisé par "transfert" : retirer ici et ajouter là, pour trouver un surcroît d'efficacité. A cet accroissement de performances correspond une différenciation des fonctions constructives, une lisibilité de comportements spécialisés.

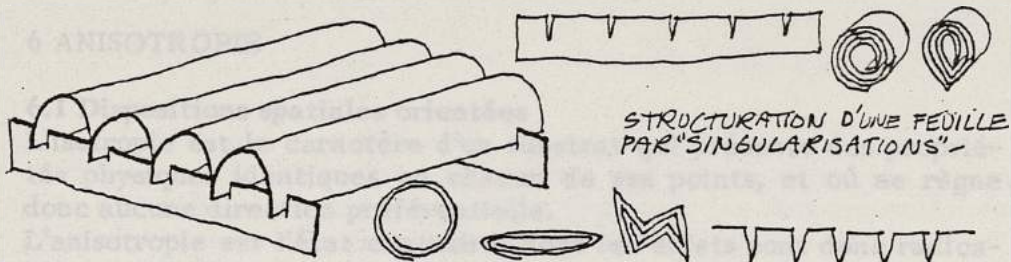


DOMAINES DE MÊME DENSITÉ ET CONSTITUTION D'HABITAT GROUPE.



5.3 Association du travail de surface et d'ossature

Le pliage, par son extrême souplesse conformatrice se prête particulièrement à de telles aptitudes structurantes, amenant dans un milieu homogène et neutre des différenciations bien caractérisées. (Et la diversité de ses effets, qu'inventorie cette étude, autorise même toutes nuances utiles de pliage, afin qu'aux grandes catégories d'emplacements - et donc de comportements - correspondent dans des dispositions plissées des formes de résistance appropriées).

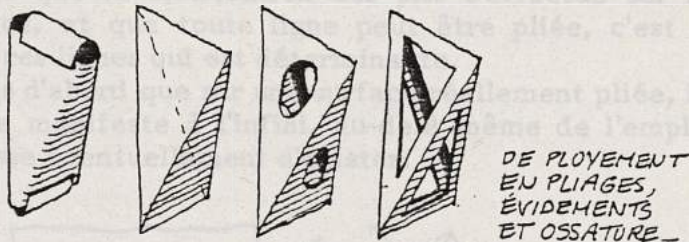


STRUCTURATION D'UNE FEUILLE PAR "SINGULARISATIONS"

Il résulte des "polarités" propres au pliage d'une surface des comportements composites, alliant le travail de surface (à composer et à solliciter selon la logique du continu) et le travail d'ossature (à composer et solliciter selon la logique du discontinu). Il s'agit bien là d'une superposition d'effets, addition qui est par conséquent potentiellement dispensatrice d'un "plus".

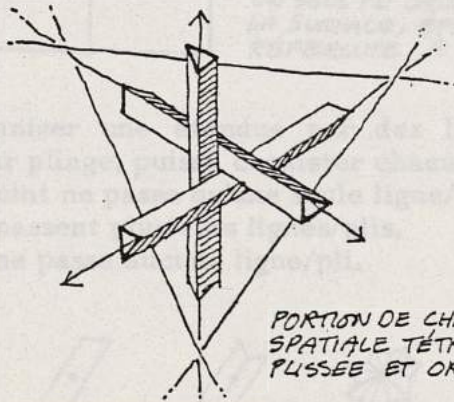
On peut, selon les dispositions que l'on adopte, évoluer plus ou moins vers l'un ou l'autre cas :

- Aspect plutôt continu par ploiement progressif (travail d'enveloppe périphérique). L'aspect plutôt discontinu par plis nets ; des évidements, pratiqués aux emplacements centraux de moindre travail, réalisent des squelettes qui accomplissent un travail d'ossature.



DE PLOIEMENT EN PLIAGES, ÉVIDEMENTS ET OSSATURE

Le comportement mécanique des ossatures a déjà été évoqué. Ce travail d'ossature (plissée) est aussi à envisager selon les performances statiques et dynamiques des charpentes spatiales.



PORTION DE CHARPENTE SPATIALE TÉTRAÉDRIQUE PLISSÉE ET ORIENTÉE

En guise de conclusion, notons qu'en vertu de ce principe universel de polarité, c'est généralement en amenant des éléments à des états extrêmes caractérisés, et que l'on oppose de la manière la plus antagoniste possible, que se réalisent les meilleures performances.



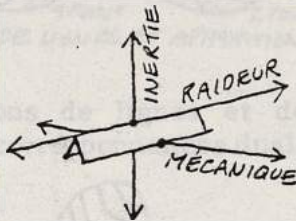
6 ANISOTROPIE

6.1 Dispositions spatiales orientées

L'isotropie est le caractère d'un substrat qui présente des propriétés physiques identiques en chacun de ses points, et où ne règne donc aucune direction préférentielle.

L'anisotropie est l'état contraire, dont les effets sont donc radicalement différents, directionnels.

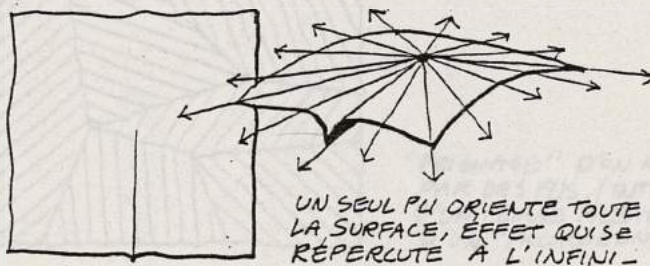
Du fait que le pli est conjointement orientation et singularité, découle le caractère fortement anisotrope d'un système plissé. Cette différenciation est triple dans l'espace tridimensionnel, et son caractère a déjà été considéré localement de diverses manières (orientation, dualité, mécanique, inertie, polarité...)



Qu'en est-il globalement ?

Etant donné que la distribution des plis s'effectue sur l'étendue d'une surface, et que toute ligne peut être pliée, c'est la façon de répartir ces lignes qui est déterminante.

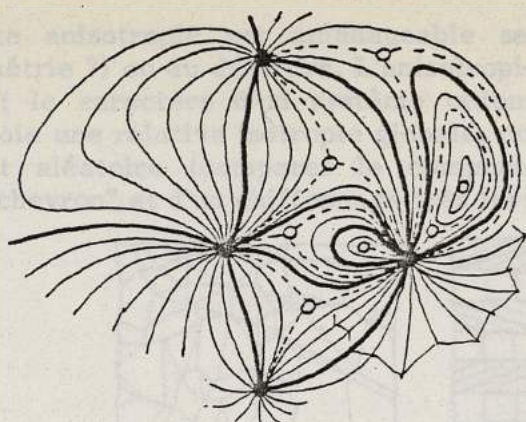
Mentionnons d'abord que sur une surface réellement pliée, l'influence du pli se manifeste à l'infini, au-delà même de l'emplacement où le pli cesse éventuellement d'exister.



Tentons d'organiser une étendue par des lignes de telle façon que, comme par pliage, puisse coexister chacun de ces cas :

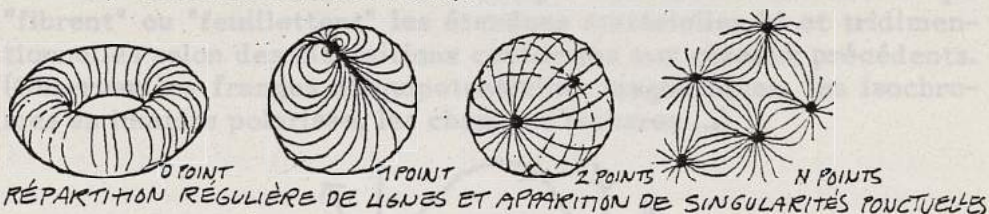
- par chaque point ne passe qu'une seule ligne/pli,
- par un point passent plusieurs lignes/plis,
- par un point ne passe aucune ligne/pli.





DISTRIBUTION DE LIGNES
ET DISTINCTION ENTRE
LES TYPES DE POINT -

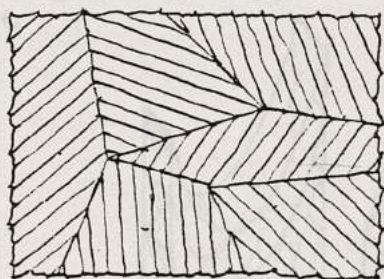
On constate que l'existence de chacun de ces domaines est subordonnée à l'orchestration globale de chacun d'entre eux, selon des relations analogues à celles qui régissent les réseaux eulériens déjà évoqués (cf. "topologie"), et d'une manière qui dépend donc des particularités globales du support spatial (caractéristique d'Euler/Poincaré de la surface).



Toutes ces répartitions de lignes et de points singuliers sont à observer dans leurs correspondances duales.

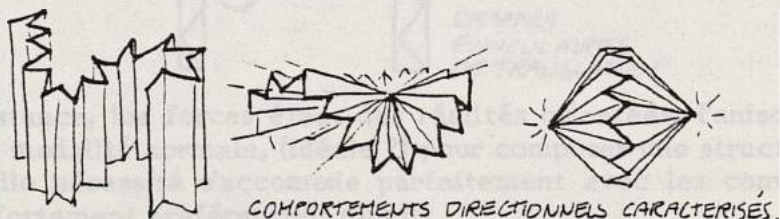


Remarquer qu'à tout réseau de lignes courbes "curvipliables" correspond bien sûr une configuration analogue constituée de lignes brisées.

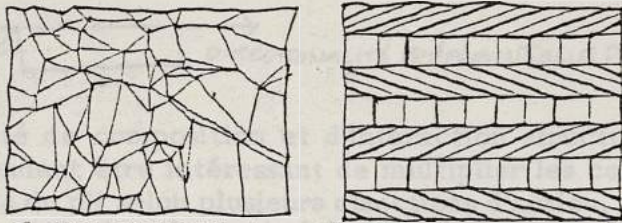


"PEIGNAGE" D'UN RECTANGLE
PAR DES PLS. (INTERFÉRENCE
D'UN PLIAGE ALÉATOIRE ET
D'UN "ACCORDEON" REPLIAGE)

C'est moyennant ces impératifs de distribution de l'étendue que s'exerce une anisotropie, c'est-à-dire un comportement structural directionnel très affirmé, que confirme toute manipulation.



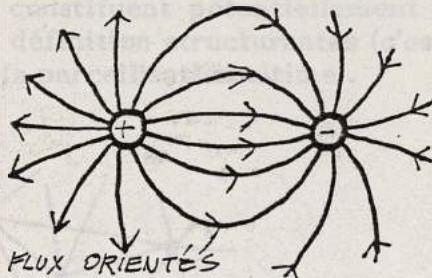
Cette anisotropie est aménageable selon les règles de l'ordre (symétrie ?) ou du désordre. L'anisotropie est d'ailleurs essentiellement le caractère d'un système ordonné, alors que le désordre octroie une relative isotropie globale, pour autant qu'il soit localement aléatoire (comparer le comportement global d'un pliage en "chevron" et d'un chiffonnage très fortement "hasardeux").



PLIAGE GLOBALEMENT ISOTROPE (DESORDONNÉ)
ET ANISOTROPE (ORDONNÉ) -

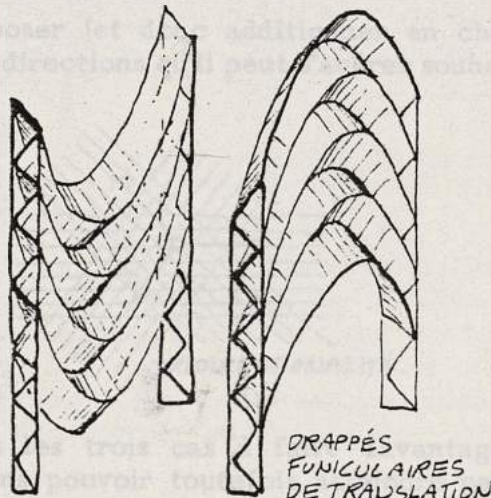
6.2 Jeu directionnel des forces

En termes maintenant physiques, l'interaction entre des pôles influents s'exerce selon des champs d'action directionnels qui "fibrent" ou "feuillettent" les étendues matérielles bi et tridimensionnelles selon des dispositions conformes aux réseaux précédents. (Observer les franges d'équipotentielles magnétiques, les isochromes en lumière polarisée, les champs d'isobares ...)



FLUX ORIENTÉS

C'est donc selon ces lignes d'action qui dirigent la matière, telles que les isostatiques d'une pièce soumise à des contraintes, qu'il est structurellement intéressant d'organiser des réseaux de plis - et surtout dans les directions vulnérables de compression. Ceux-ci s'organisent d'ailleurs parfois d'eux-mêmes selon la mécanique autorégulante des systèmes funiculaires déjà évoqués fréquemment.



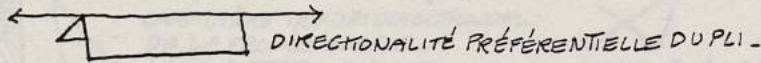
DRAPPÉS
FUNICULAIRES
DE TRANSLATION

En substance, les forces étant des réalités orientées, l'anisotropie est une modalité normale, (idéale ?) pour composer une structure. Une telle nécessité s'accommode parfaitement avec les comportements fortement préférentiels du pli.

7 MULTIDIRECTIONALITE

7.1 Distribution de directions de travail

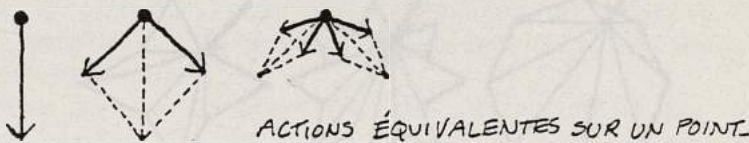
Bien qu'elle se manifeste de manière différente selon la direction considérée, l'anisotropie du pli simple est, d'un point de vue local, essentiellement unidirectionnelle.



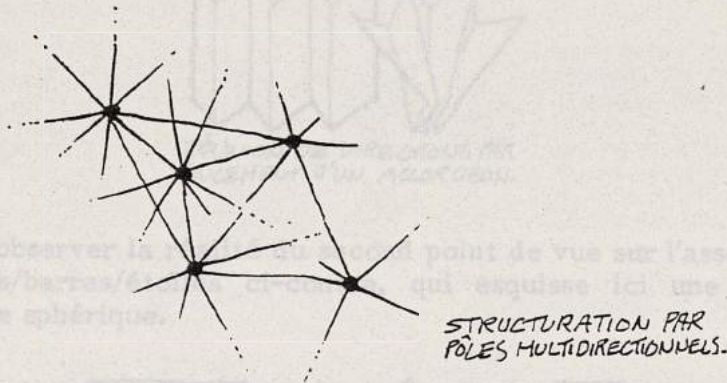
Par nécessité de composition et d'interaction structurale globale, il peut cependant être intéressant de multiplier les comportements préférentiels du pli selon plusieurs directions d'action.

Cet intérêt réside dans les trois faits suivants :

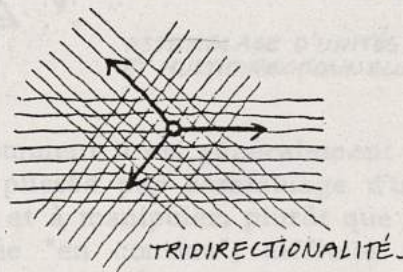
- plus une force se décompose en un nombre important de composantes, plus les actions sont faibles au long de ces directions.



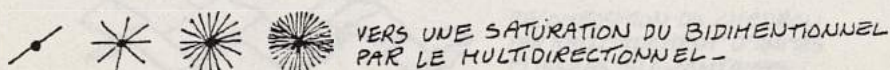
- Ces directions constituent potentiellement autant de supports de connexion, par définition structurantes (c'est alors la triangulation qui constitue la parcellisation ultime).



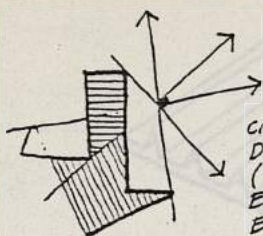
- On peut superposer (et donc additionner en chaque point) les effets d'autant de directions qu'il peut s'avérer souhaitable.



Cela revient dans les trois cas à faire davantage travailler le bidimensionnel, sans pouvoir toutefois atteindre par le discontinu (discret) la puissance du continu.



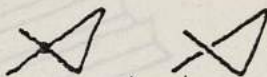
On peut observer la réalité du premier point de vue sur le pli composé (fronce simple) qui conjugue quatre directions de plis autour d'un point.



CARACTÈRE QUADRIDIRECTIONNEL DE LA FRONCE SIMPLE - (LES DIRECTIONS SONT EN MÊME TEMPS SPATIALES ET BIDIMENSIONNELLES -)

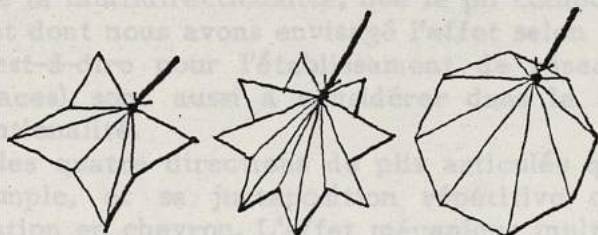


JEU MULTIDIRECTIONNEL PAR PLS SIMPLES -



LIGNE PLIÉE DÉFINISSANT TROIS DIRECTIONS PLANES DU SPATIALES -

On peut multiplier à loisir les directions d'action sur des nœuds étoilés, par surpliage, par raccordements, par pincement/déploiement d'éventails/accordéons, par facetage polyédriques, etc...)

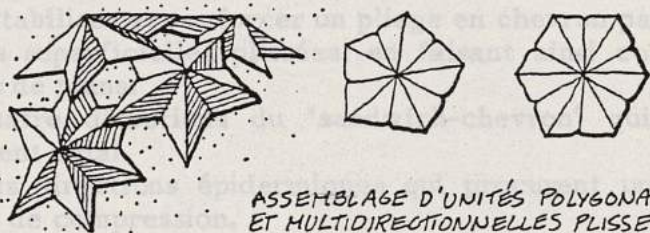


AUGMENTATION DE RÉSISTANCE EN FONCTION DU NOMBRE DE PLS (ET DE FACES ..) -



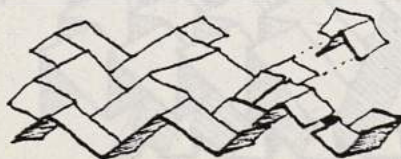
RÉUNION DE DIRECTIONS PAR PINCEMENT D'UN ACCORDÉON.

On peut observer la réalité du second point de vue sur l'assemblage de nœuds/barres/étoilés ci-contre, qui esquisse ici une portion de calotte sphérique.



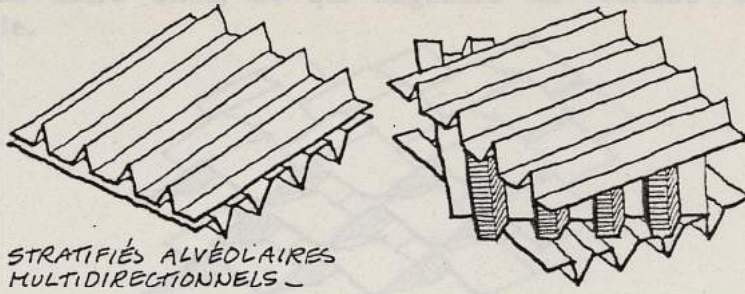
ASSEMBLAGE D'UNITÉS POLYGONALES ET MULTIDIRECTIONNELLES PLSSEÉS -

On remarque là comment il est généralement plus réaliste d'édifier une construction plissée par assemblage d'unités indépendantes, aisées à fabriquer et à manipuler, plutôt que par la mise en œuvre d'une surface pliée "en continu", difficile ou même impossible à réaliser techniquement (ne serait-ce que manuellement) tant la configuration géométrique ou le système mécanique global est complexe.



RECOMPOSITION DU CHEURON PAR RACCORDEMENT D'UNITÉS PLSSEÉS ÉLÉMENTAIRES -

C'est enfin le troisième point de vue qu'illustrent les panneaux alvéolaires plissés/croisés ci-dessous, à la manière des nombreux stratifiés ou contreplaqués multicouches naturels ou artificiels.

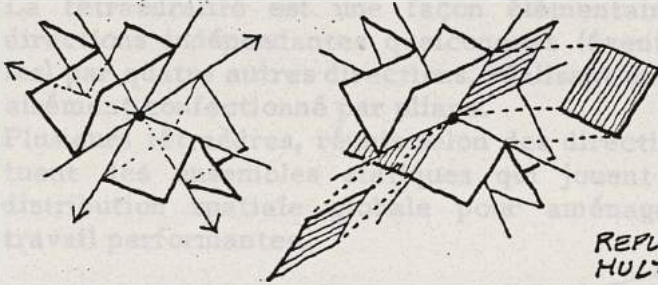


STRATIFIÉS ALVÉOLAIRES
MULTIDIRECTIONNELS -

7.2 Coordination de réseaux structurant le tridimensionnel

Ces effets de la multidirectionnalité, que le pli composé comporte par nature, et dont nous avons envisagé l'effet selon des étendues planaires (c'est-à-dire pour l'établissement de réseaux évoluant sur des surfaces) sont aussi à considérer dans la structuration de la tridimensionnalité.

Considérons les quatre directions de plis articulés que constitue la fronce simple, et sa juxtaposition répétitive qui engendre une configuration en chevron. L'effet mécanique multidirectionnel de cette fronce peut être étendu dans l'espace en prolongeant chaque direction de droite et certaines orientations de plan, qui se recoupent alors selon un système totalement repliable généralisé.



SYSTÈMES PLIABLES
FORMÉS DE FRONCES
OPPOSÉES PAR LE SOMMET.

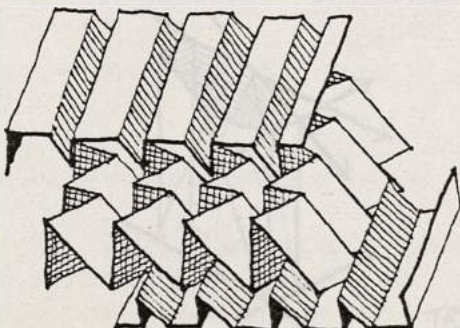
ON PEUT AJOUTER DES
FACES INTERSTICIELLES
QUI NE PERTURBENT PAS
LA REPLIABILITÉ -

REPLIABILITÉ ÉTENDUE À LA
MULTIDIRECTIONNALITÉ -

On peut stabiliser et renforcer un pliage en chevron par l'apposition de nappes superficielles plissées, en faisant ainsi collaborer sept directions de plans.

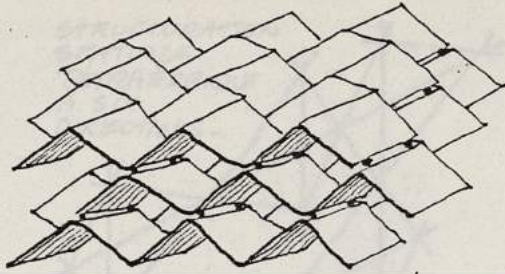
- Les quatre directions du "sandwich-chevron" qui résistent à l'écrasement axial.
- les trois directions épidermiques qui procurent une inertie de flexion et de compression.

On a ici un panneau sandwich alvéolaire dont la multidirectionnalité octroie une polyvalence constructive, aussi valablement paroi porteuse que dalle porteuse/franchisseuse.



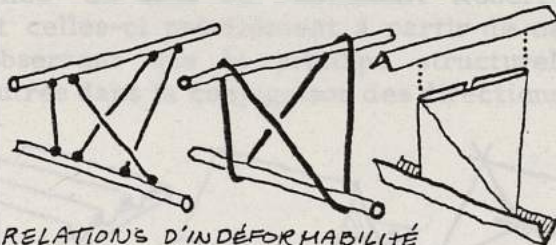
CHEVRON
BLOQUÉ PAR
MISE EN "SANDWICH"

L'effet mécanique multidirectionnel du chevron peut aussi être étendu globalement à l'espace en prolongeant chaque direction de pli et de plan. Cela revient à raccorder plusieurs nappes de chevrons entre elles, ce qui engendre un "volume" alvéolaire repliable.



NAPPES EN CHEVRON SUPERPOSÉES FORMANT DES CLOISONNEMENTS REPLIABLES -

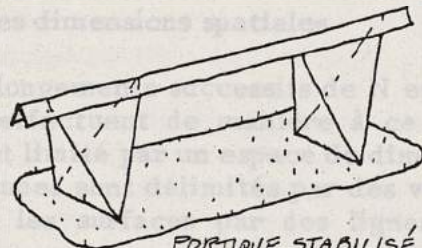
On complètera la compréhension de l'effet structurant de la multidirectionnalité dans l'espace en analysant la construction ci-dessous.



RELATIONS D'INDÉFORMABILITÉ INTERPRÉTÉES PAR PLIAGE -

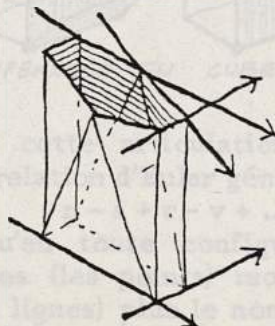
La tétraédralité est une façon élémentaire de connecter deux directions indépendantes quelconques (éventuellement orthogonales) par quatre autres directions, réalisant un système indéformable aisément confectionné par pliage.

Plusieurs tétraèdres, réunis selon des directions communes constituent des ensembles statiques qui jouent subtilement de leur distribution spatiale globale pour aménager des conditions de travail performantes.



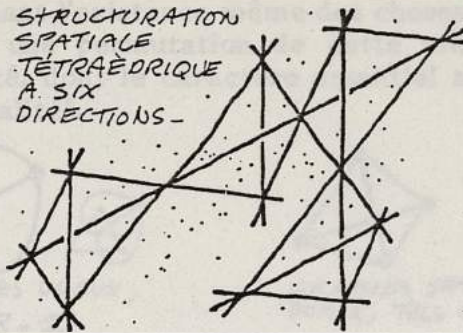
FOURQUE STABILISÉ PAR JEU MULTIDIRECTIONNEL -

On comprend ici comment certaines directions de travail à un niveau peuvent être mises en relation avec d'autres directions complémentaires par l'intermédiaire de lignes transitionnelles.

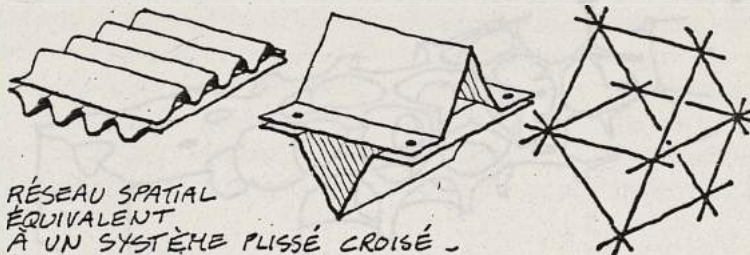


TRANSITION SPATIALE ENTRE LE BI ET LE TRIDIRECTIONNEL -

Des réseaux, composés selon ce principe de collaboration multidirectionnelle (tel celui que l'on obtient en prolongeant et en répétant les directions initiales) forment des constructions structurellement performantes par la seule stratégie de la distributivité directionnelle.



C'est là un des fondements de composition des structures dites "tridimensionnelles" au sens où l'entendait Robert Le Ricolais, qui a découvert celles-ci précisément à partir de nappes plissées croisées, en observant que le principe structurellement actif résidait entre autres dans la conjugaison des directions spatiales.

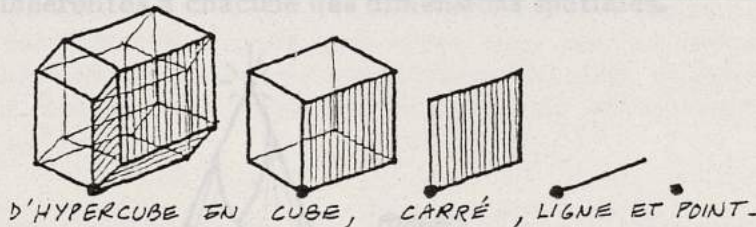


8 MULTIDIMENSIONALITE

8.1 Organisation des dimensions spatiales

Les inéluctables plongements successifs de N espaces de dimension N-1, N-2 etc... s'effectuent de manière à ce que chaque espace de dimension N soit limité par un espace de dimension N-1.

Ainsi les hypervolumes sont délimités par des volumes, les volumes par des surfaces, les surfaces par des lignes et les lignes par des points.

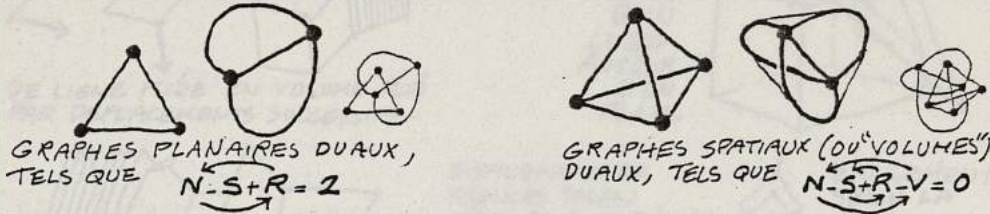


C'est en fait cette articulation fondamentale de la spatialité qu'annonce la relation d'Euler généralisée :

$$n - s + r - v + \dots = \text{constante}$$

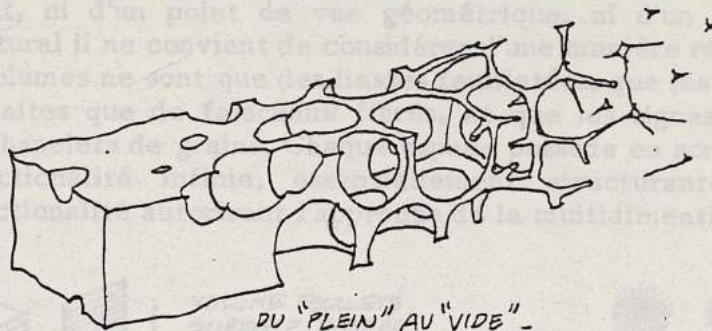
c'est-à-dire qu'en toute configuration le nombre d'éléments à zéro dimensions (les points) moins le nombre d'éléments à une dimension (les lignes) plus le nombre d'éléments à deux dimensions

(les surfaces) moins le nombre d'éléments à trois dimensions (les volumes) plus etc... est égal à une constante qui caractérise le support spatial considéré. Il en découle que tout ce qui existe possède un début et une fin (distincte ou confondue), qu'il ne saurait exister de volume à cinq faces triangulaires et d'autres propriétés concernant l'existence même des choses de l'espace. C'est encore par une permutation de cette même relation que s'exprime la dualité, dont le caractère essentiel a déjà été évoqué au paragraphe "Dualité".



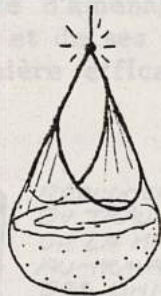
8.2 Répartition hiérarchisée du travail

Naturellement aménagé selon cet ordre progressif, l'espace est de plus en plus désaturé, aménageant des vides qui permettent une occupation de l'espace de plus en plus "libre".



Il en résulte que la construction de cet espace "libéré" nécessite en contrepartie des stratégies de composition de plus en plus subtiles, puisque l'art d'échafauder une structure devient en quelque sorte la manière de faire des trous de plus en plus grands, avec "rien" (ou le moins possible de matière).

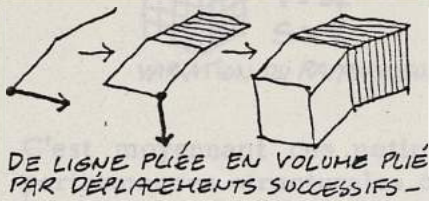
C'est en tous cas selon cet ordre que l'on peut progressivement acheminer des contraintes physiques d'une masse tridimensionnelle dans des surfaces, qui canalisent les efforts selon des lignes qui guident ces forces à des points où celles-ci s'annulent finalement. Chaque constituant spatial est à ce jeu sollicité de plus en plus intensément, moyennant une collaboration effective des diverses aptitudes inhérentes à chacune des dimensions spatiales.



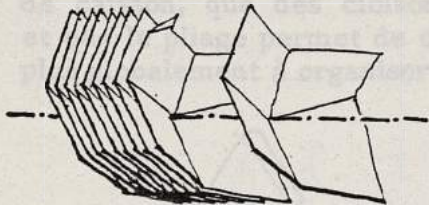
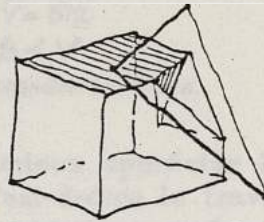
FORCES CHEMINANT DE MASSE EN SURFACE, LIGNE ET POINT.

Les constructions plissées sont donc très naturellement concernées par ce mode de composition spatiale, et de deux manières réciproques :

En effet, le pliage de volumes se réalise autour de surfaces, celui des surfaces autour de lignes et celui des lignes autour de points, ce que raconte encore la génèse spatiale inverse par déplacements successifs : un point trace une ligne brisée, une ligne brisée trace une surface plissée, une surface pliée décrit un volume pliée etc...



PLIAGE D'UN CUBE AUTOUR D'UN PLAN -



EMPILEMENT DE FRONCES SELON L'AXE DU QUADRI RE FORMÉ PAR L'INTERSECTION DES PLANS BISSECTEURS DES DIÈDRES -

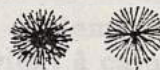


EMPILEMENT SELON LA BISSECTION DU PLI - (PLIAGE AVEC GLISSEMENT DES FACES)

Cependant, ni d'un point de vue géométrique, ni d'un point de vue structural il ne convient de considérer d'une manière réductrice que les volumes ne sont que des liasses feuilletées, que les surfaces ne sont faites que de faisceaux fibrés, et que les lignes ne sont que des chapelets de grains. Chaque espace possède en son support une directionalit  infinie, essentiellement structurante, cette multidirectionalit  autorisant l'approche de la multidimensionalit .



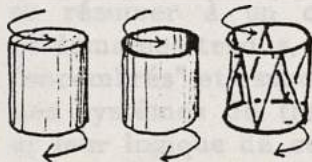
VOLUME FEUILLETÉ, SURFACE FIBR E, LIGNE PERLÉE, REPRESENTATIONS LIMITATIVES DES DIMENSIONS SPATIALES.



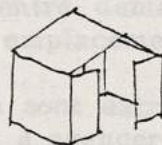
(IM)POSSIBILITÉ DE SATURER LE PLAN ET L'ESPACE PAR LE MULTIDIRECTIONNEL.

8.3 Collaboration structurale des dimensions spatiales

Il a par ailleurs été apprécié, en vertu des principes d'inertie et de polarité, combien il est structurellement efficace ( conomique) d'amener des limites périphériques à des  tats de travail antagonistes. Aussi puisque toute matérialité possède une épaisseur tridimensionnelle, et que c'est effectivement cette tridimensionalit  qu'il nous importe d'aménager, c'est bien par un travail de surface périphérique et de ses constituants linéaires et ponctuels qu'il existe une manière efficace de composer structurellement "au minimum".



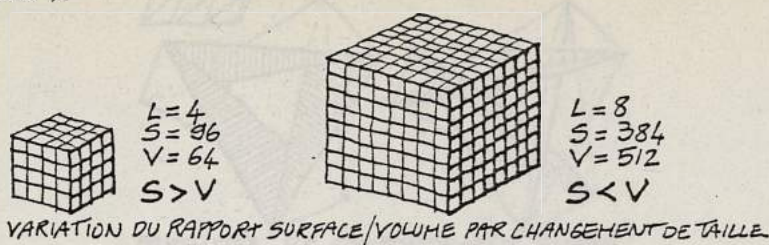
RÉDUCTION DU TRAVAIL DE LA MASSE AU TRAVAIL DES LIMITES



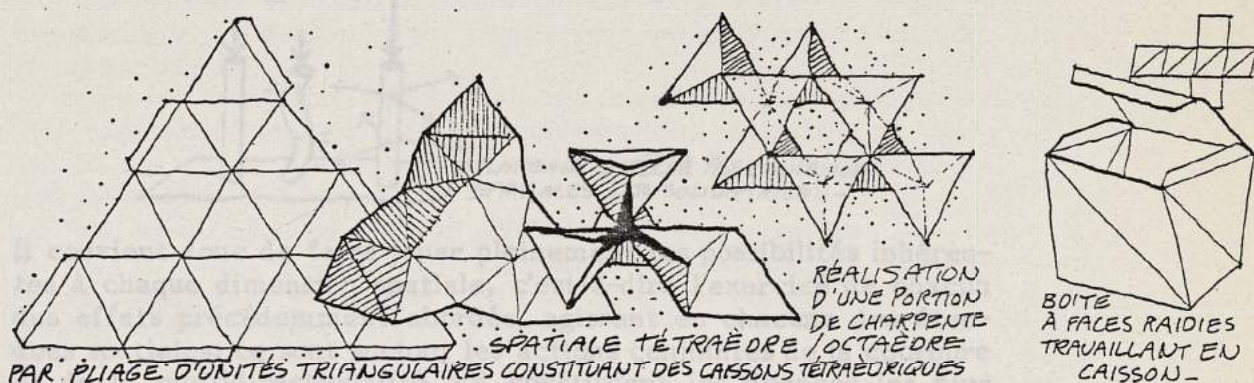
DÉFINITION, AMÉNAGEMENT ET CONSTRUCTION DE L'ESPACE PAR SES LIMITES -

La validité de cette façon de construire en surface est encore confortée par la variation du rapport surface/volume d'un objet,

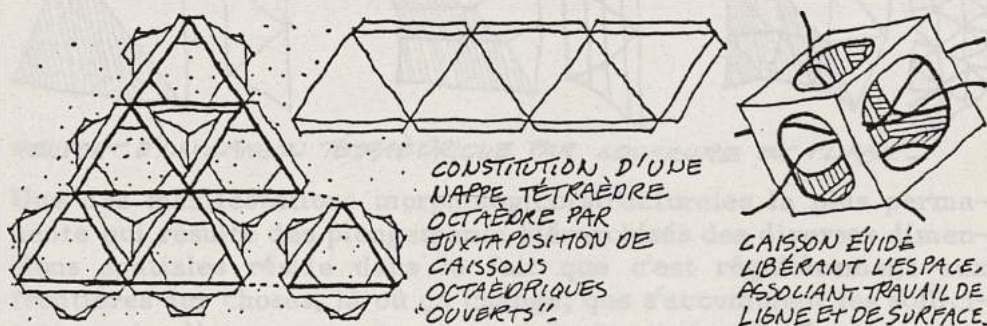
de plus en plus favorable et économique pour des volumes importants (il y a "moins" de surface pour les "gros" volumes que pour les "petits").



C'est moyennant ces notions que l'on peut mieux apprécier les performances structurales des corps creux, c'est-à-dire le travail de caisson, que des cloisonnements multiples peuvent renforcer et que le pliage permet de constituer et de nervurer. (Cela revient plus globalement à organiser des configurations alvéolaires).



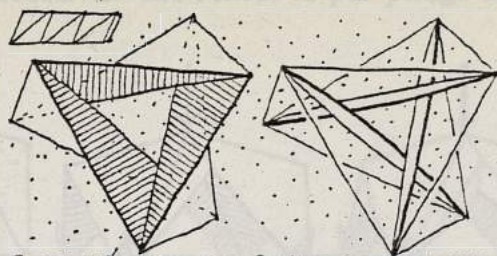
On peut dans ces constructions pratiquer des évidements aux emplacements intermédiaires et neutres. Cela en vient à caractériser un travail d'ossature, qui constitue la quintessence de la composition structurale, surtout à la manière dont l'a abordé Robert Le Ricolais, c'est-à-dire comme jeu de connexions topologiques établissant la coopération des diverses dimensions spatiales.



Rappelons à cette occasion que tout travail de structure peut se résumer à un conflit équilibré entre domaines comprimés et domaines tendus, c'est-à-dire entre emplacements spatialement "encombrés" et espaces "libérés".

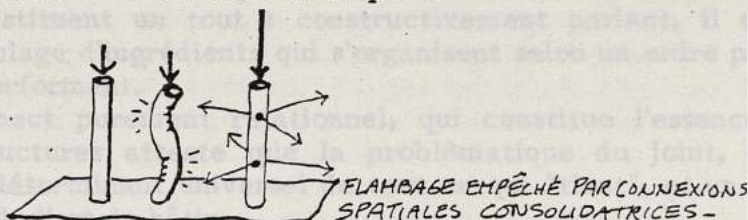
Les systèmes de traction/compression sont extrêmement divers, et leur logique de composition revient à agencer convenablement des dimensions spatiales appropriées : comparer par exemple la similitude de comportement entre le système autotendant constitué de "barres" et de "câbles" et l'antiprisme triangulaire

giratoire plissé, où la spatialité des zones plissées correspond valablement au travail des éléments comprimés.



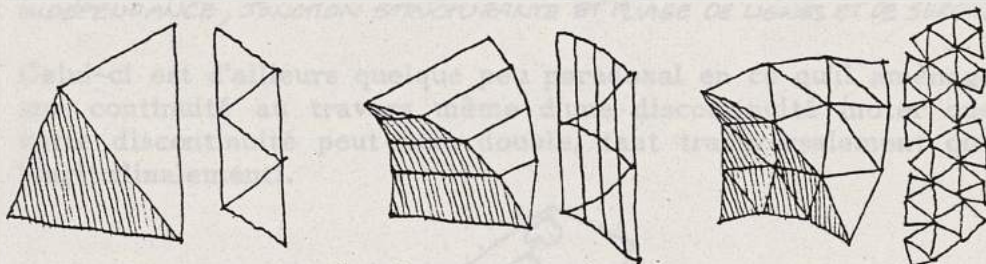
PARENTÉS DE COMPORTEMENT ENTRE
UNE BANDE PLIÉE ET UN AUTOTENDANT

C'est enfin dans tous les cas le recours à la spatialité qui est l'auxiliaire de l'efficacité structurale. Par exemple, pour se briser, un élément comprimé a besoin d'évoluer dans une dimension spatiale supérieure, ce qu'empêchent bien entendu des connexions effectivement situées dans cet espace.



FLAMBAGE EMPÊCHÉ PAR CONNEXIONS
SPATIALES CONSOLIDATRICES -

Il convient donc de faire jouer pleinement les possibilités inhérentes à chaque dimension spatiale, c'est-à-dire l'exercice de chacun des effets précédemment abordés, agissant en chacune des étendues spatiales; ce sont surtout les actions conjointes de la courbure et de la multidirectionnalité qui constituent les données les plus agissantes dans le bidimensionnel lequel délimite le tridimensionnel (apprécier par exemple l'augmentation de résistance d'un caisson tétraédrique sous l'effet de son poids propre en fonction des courbures et directions de plis).



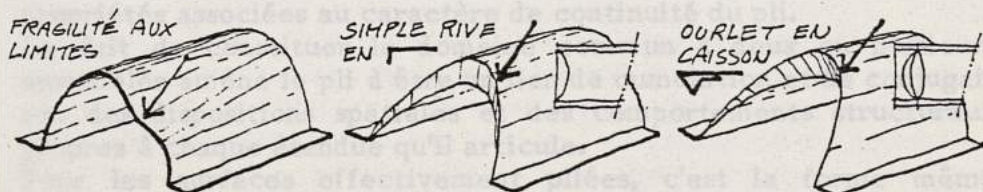
RENFORT D'UN CAISSON TÉTRAÉDRIQUE PAR COURBURE ET PLIAGE -

Une des manifestations morphologico/structurales la plus permanente qui résulte des plongements hiérarchisés des diverses dimensions spatiales réside dans le fait que c'est régulièrement aux frontières des choses, là où ça change, que s'accumulent les sollicitations de divers supports et que, "par construction", s'exercent là les interactions les plus exacerbées.

C'est ainsi qu'aux rives libres d'une surface doivent généralement être aménagées des dispositions particulières.

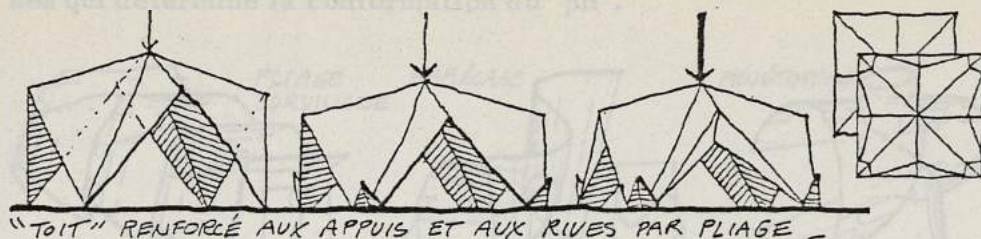


RIVES
ET CAP,
ATTAQUÉS



BERCEAU CYLINDRIQUE PROGRESSIVEMENT RENFORCÉ PAR PLIAGE COURBE LIMITROPE

On peut encore apprécier ces effets sur la résistance de ce simple "toit" plissé, successivement renforcé par pliage aux emplacements limitrophes.



"TOIT" RENFORCÉ AUX APPUIS ET AUX RIVES PAR PLIAGE -

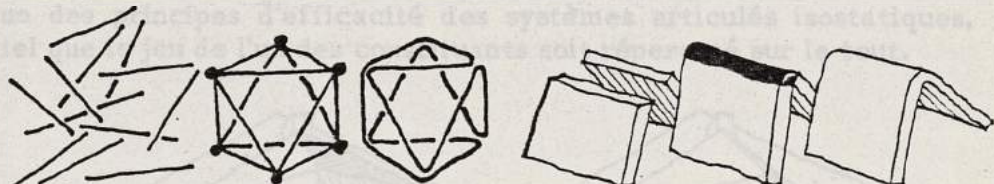
9 TRANSITIVITE

9.1 Intersection pliée formant joint unifiant

Les formes et les structures, envisagées perceptivement ou conceptuellement, sont des systèmes de relations entre des éléments qui constituent un tout : constructivement parlant, il s'agit de l'assemblage d'ingrédients qui s'organisent selon un ordre physiquement performant.

Cet aspect purement relationnel, qui constitue l'essence même des structures atteste que la problématique du joint, du lien, est un déterminant universel de tout ce qui "tient", et un moment décisif de l'art de bâtir.

Si l'on admet que ce qui est solidaire est plus structuré que ce qui est disjoint, il faut bien considérer que le pli, qui articule continûment deux voisinages qu'il détermine, possède par là même quelque effet éminemment structurant.



INDÉPENDANCE, JONCTION STRUCTURANTE ET PLIAGE DE LIGNES ET DE SURFACES

Celui-ci est d'ailleurs quelque peu paradoxal en ce qu'il aménage une continuité au travers même d'une discontinuité (noter que cette discontinuité peut être double, tant transversalement que longitudinalement).



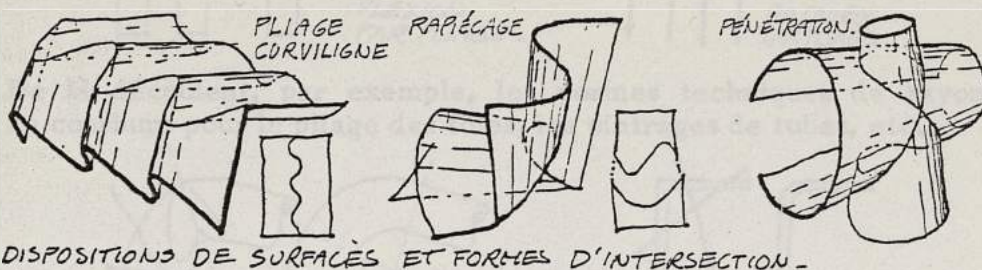
DISCONTINUITÉ
TRANSVERSALE ET
LONGITUDINALE -

Ce qui découle du caractère discontinu a été traité aux chapitres "Discontinuité" et "Polarité". Envisageons donc, en complément des considérations esquissées au paragraphe "Intersection", les propriétés associées au caractère de continuité du pli.

Le fait de constituer le domaine commun à deux ou plusieurs ensembles amène le pli à être un lien de cumulation et de conjugaison des dispositions spatiales et des comportements structuraux propres à chaque étendue qu'il articule.

Pour les surfaces effectivement pliées, c'est la forme même du pli qui conditionne la disposition des nappes.

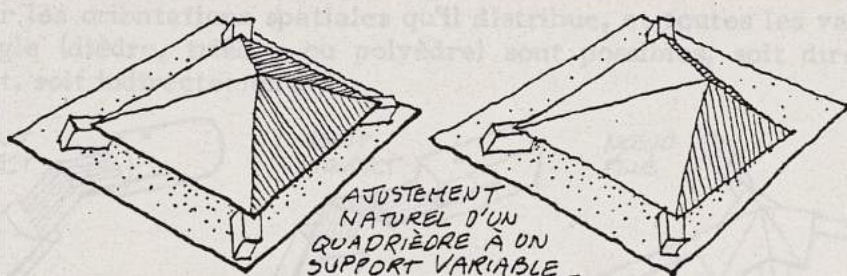
Pour les "rapièçages" de nappes de surface, c'est pareillement la forme de la découpe qui impose la forme des nappes.
 Pour les intersections stricto sensu, c'est alors la forme des surfaces qui détermine la conformation du "pli".



En chacun de ces trois cas, la libre mécanique de la surface - à laquelle on ne peut toutefois imposer que certains registres de déformation, fait jouer le pli, lui imposant une disposition spatiale en conséquence. (Il convient là de distinguer le comportement radicalement différent du cas où le pli demeure fixe sur la surface du cas où il se déplace, comme les ondoiements d'un drapeau).

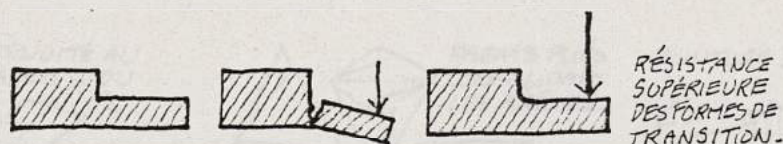
Ainsi la mécanique du pli fait participer l'ensemble d'une structure dans un comportement homogène ; chaque perturbation qui affecte quelque emplacement est répercutée sur l'ensemble, autorisant une autorégulation globale du système, dans le genre "je plie mais ne romps pas".

C'est cette accommodation globale d'une construction qui constitue un des principes d'efficacité des systèmes articulés isostatiques, tel que le jeu de l'un des constituants soit répercuté sur le tout.

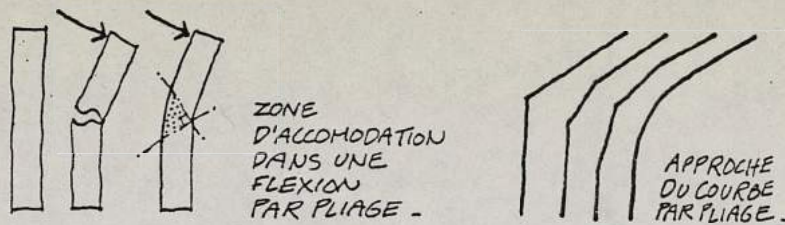


9.2 Ploiment et transition formelle consolidatrice

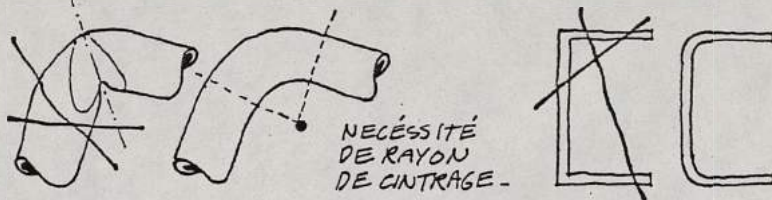
Il est un autre principe d'efficacité structurale propre au continu que le pli, par sa quasi-continuité, peut organiser : des objets, qui offrent des transitions formelles progressives, courbes, peuvent être moins vulnérables que ceux qui présentent de brusques variations.



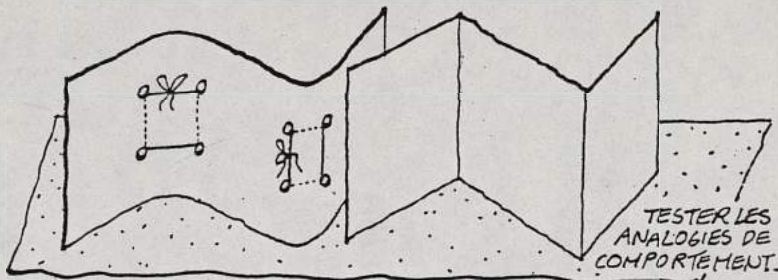
Ce principe ("arrondir les angles"), assorti des transferts de matière obligés qui surviennent lors du ploiment d'un objet, autorise la fabrication d'éléments structuraux qui bénéficient des données précédemment exposées ainsi que de l'efficacité de la courbure. (Le pliage "net" permet d'ailleurs une approximation aussi fine de la courbure que l'on peut désirer).



De là découlent, par exemple, les normes techniques de rayon de courbure pour le pliage des tôles, les cintrages de tubes, etc..

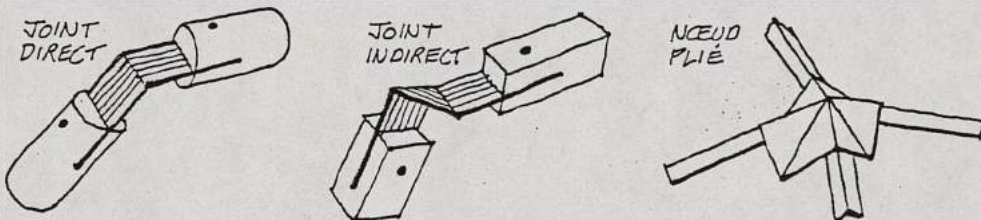


Expérience : comparer les comportements respectifs d'une feuille conditionnée à divers ploiement continu et d'une feuille pliée en zig-zag net analogue.



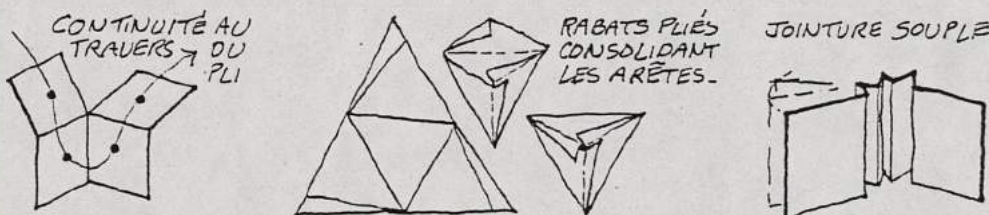
Ces observations amènent naturellement à employer usuellement le pli en tant que joint d'assemblage :

- par les orientations spatiales qu'il distribue, et toutes les valeurs d'angle (dièdre, trièdre ou polyèdre) sont possibles, soit directement, soit indirectement.

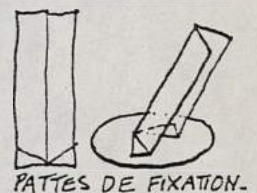


COORDINATION DE DIRECTIONS SPATIALES PAR PLIAGE -

- par la solidarité qu'il aménage dans tous les cas.
- par l'éventuelle résistance qu'il octroie.
- par l'éventuelle souplesse articulaire que, telle une charnière, il présente.

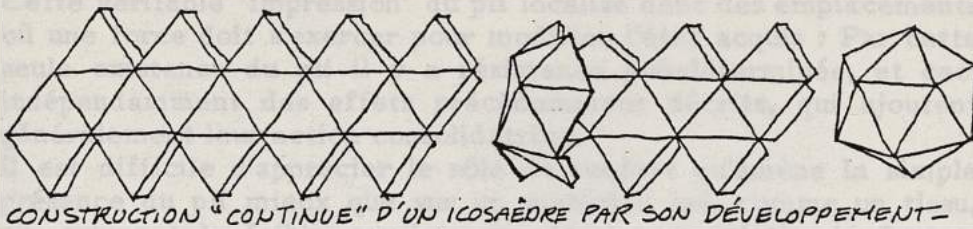


C'est un composant essentiel de tout "meccano" constructif, que l'on sait utiliser séparément, comme pièce de raccordement, ou intégrer aux éléments à assembler comme patte de fixation.



9.3 Pliage et procédure de mise en forme simplificatrice

Il y a enfin, dans le seul fait de confectionner un objet par pliage effectif (tout comme par moulage d'ailleurs, ou par d'autres techniques dans le genre du modelage) une intention de mettre en forme la matière selon un procédé essentiellement continu, qui simplifie et réduit les opérations d'assemblage dans un jeu unificateur et coordinateur très immédiat. Cela fait du pliage une façon très constructive d'imaginer la structuration formelle, et qui peut par son évidence constituer un mode de représentation mentale, une véritable "pensée formelle" (ce dont témoigne par exemple, l'œuvre de Jean Prouvé).



10 PRECONTRAINTE

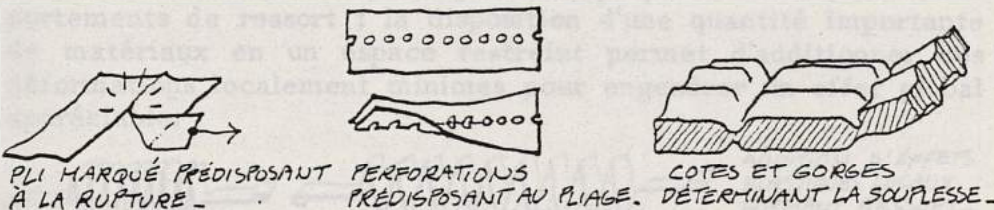
10.1 Impression du pli et accumulation d'énergie

Toute forme constituée possède en général quelque aptitude à résister, parfois équivalente ou supérieure à l'énergie qui a été "dépensée" pour la "construire". Il s'agit en quelque sorte d'une collecte et d'une mise en conserve de forces dont la stabilité structurale (au sens ou l'entend René Thom dans ses théories sur la morphogénèse) tient à la cohérence majoritairement "attractive" de ses réactions internes.

Cet effet de forme s'exerce tangiblement aussi dans les objets plissés. Toute réalisation de plis nécessite une certaine dépense d'énergie; deux cas se présentent alors :

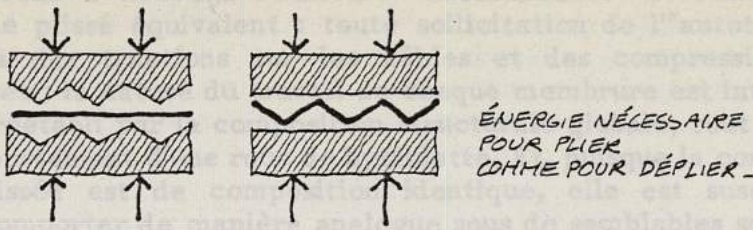
- Une condition où, comme par pliage de papier, le pli occasionne une blessure affaiblissant le matériau (par rupture de fibres celluloseuses).

Cette situation destructurante est malgré tout techniquement utile (on plie du papier pour mieux le déchirer). Il en résulte que toute faiblesse matérielle intentionnellement aménagée prédispose à un certain comportement plicatile (par exemple par simple différence quantitative de répartition de matière, ou bien toute autre façon de "marquer le pli"). D'où l'effet inverse assez voisin du relief plissé, qui consiste à accumuler de la matière formant des nervures consolidantes.



- Dans le deuxième cas, le matériau n'est pas affaibli et peut même être renforcé par le pli (ainsi le pliage d'une tôle qui se réalise lorsque, ayant dépassé le seuil de déformation élastique (qui ramène à la position de départ), on entre, par transferts de matériaux, dans le domaine des déformations plastiques, permanentes, et qui donnent donc forme.

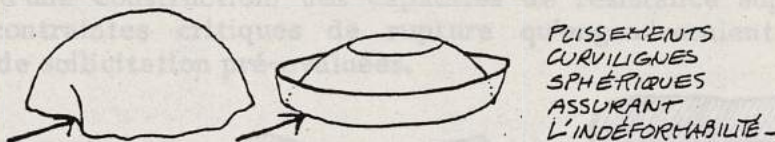
Il faut alors éventuellement une quantité d'énergie équivalente pour supprimer le pli.



Cette véritable "impression" du pli localise donc des emplacements où une force doit s'exercer pour modifier l'état acquis : Par cette seule existence du pli il y a résistance pré-déterminée, et ceci indépendamment des effets précédemment décrits, qui ajoutent généralement leur action consolidatrice.

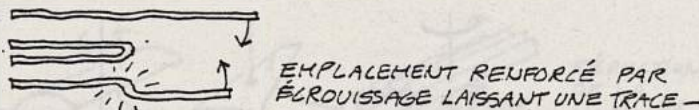
Il est difficile d'apprécier le rôle de renfort qu'amène la simple présence du pli mieux que sur un matériau qui, comme un tissu, n'a qu'une très faible consistance. Ainsi une calotte de feutre, quasi inconsistante malgré l'effet de sa courbure, trouve peu à peu par plissement une tenue appréciable.

Il faut noter ici que si le "chapeau" ainsi formé peut se déformer, ce ne peut être que moyennant un déplacement du pli ; ce déplacement nécessite quelque force, qui équivaut précisément à celle de sa résistance...



10.2 Résistance par effet de précontrainte

Il arrive même que le seul fait de plier améliore la résistance locale du support matériel par effet d'écrouissage (anisotropie octroyée par une orientation moléculaire préférentielle). C'est le cas de certains fils de fer, qu'il est plus commode de replier ailleurs que là où cela a déjà été fait.



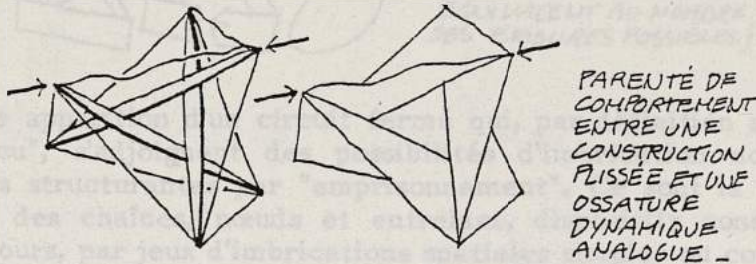
Des systèmes intensément plissés, que l'on sollicite sans franchir le seuil de déformation élastique, sont propices à offrir des comportements de ressort ; la disposition d'une quantité importante de matériaux en un espace restreint permet d'additionner des déformations localement minimales pour engendrer un effet global appréciable.



Mais on aborde ici la "cuisine" particulière des matériaux qui ne peut se traiter dans ce cadre, bien que sa maîtrise soit indispensable, puisque porteuse de toutes les concrétisations, parfois surprenantes; (songer aux récents matériaux à mémoire de forme, alliages qui empruntent spontanément et consécutivement tout

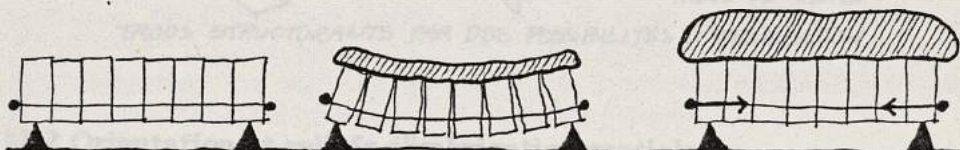
un répertoire de formes pliées et prédéterminées en fonction d'un changement de température).

Considérons à nouveau l'ossature "antotendante" et l'antiprisme triangulé plissé équivalent : toute sollicitation de l'"autotendant" produira des tractions sur les câbles et des compressions sur les barres ; la nature du travail de chaque membrure est intégralement préétabli par la composition structurale globale, tout comme le comportement d'une roue de bicyclette. Et, puisque la configuration plissée est de composition identique, elle est susceptible de se comporter de manière analogue sous de semblables sollicitations.



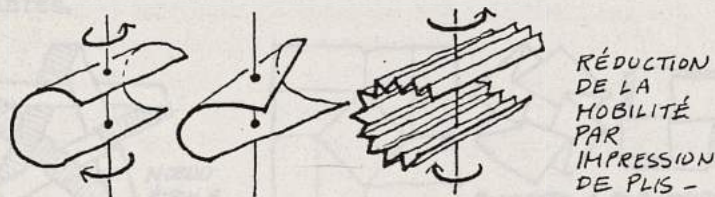
Ainsi, peut-on concevoir des constructions plissées qui, comme ces systèmes à contraintes internes, adoptent des comportements structuraux prédéterminés.

Ces divers effets peuvent en fait s'apparenter au rôle de la précontrainte; ce principe consiste à amener (aux emplacements appropriés d'une construction) des capacités de résistance supérieure aux contraintes critiques de rupture qu'engendreraient divers types de sollicitation pré-évaluées.



AUGMENTATION DE RÉSISTANCE EN FLEXION PAR PRÉCONTRAINTE -

Il en va pareillement du pli, qui ne saurait exister qu'occasionné par quelque force, et qui demeure là où il est, tant qu'il le peut, conditionnant alors le comportement des choses.



Peut-être même plus abstraitement, est-il légitime de considérer comme action de pré-contrainte toute l'énergie dépensée pour fabriquer des plis autrement que par pliage (tel que le coffrage d'un voile mince en béton armé), toute transformation d'un milieu possédant quelque équivalent énergétique...

11 IMBRICATION

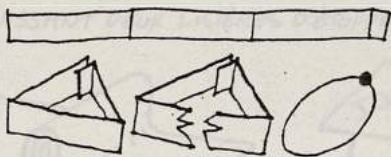
11.1 Caractère structurant de la contenance

Une imbrication, c'est-à-dire le simple fait qu'une chose en contient une autre est, par définition, un facteur de structuration, ce que précise bien l'étymologie du terme "imbriqué".

Cette aptitude tient géométriquement à deux données conjuguées,

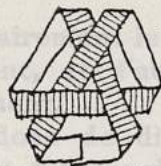
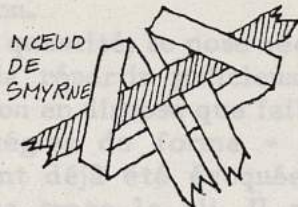
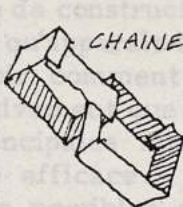
la connection topologique et l'orientation spatiale, que le pli sait naturellement organiser.

Précisons ce que les relations topologiques proposent ici de structurant, ce qui a déjà été esquissé aux paragraphes "Topologie" et "Connectivité". Une relation de fermeture, qui boucle un élément ouvert, est consolidante : en effet une coupure fait que l'élément demeurera encore d'un seul tenant quoique sectionné.



STRUCTURATION PAR FERMETURE - (NOMBRE DES "COLLAGES" ÉQUIVALENT AU NOMBRE DES BRISURES POSSIBLES)

A cette apparition d'un circuit fermé qui, par définition aménage un "trou", s'adjoignent des possibilités d'imbrication nouvelles, dès lors structurantes par "emprisonnement". Ce sont là les propriétés des chaînes, nœuds et entrelacs, dispositifs constructifs de toujours, par jeux d'imbrications spatiales simples ou complexes (c'est-à-dire avec peu ou beaucoup de plis, comme ces chaînes triviales, nœuds de trèfle et nœuds de Smyrne présentés ci-dessous.

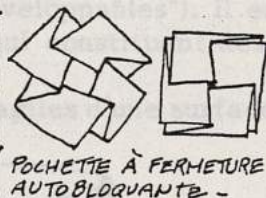
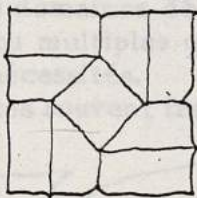
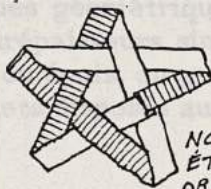


TROUS. STRUCTURANTS PAR DES POSSIBILITÉS D'IMBRICATION

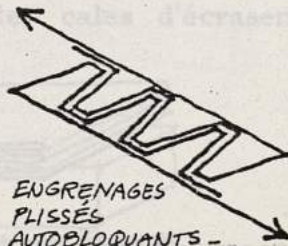
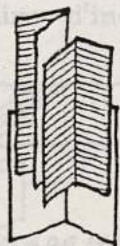
11.2 Orientation et reliefs d'imbrication spatiale

De telles imbrications ne sont réalisables que moyennant une orientation du support dans l'espace. L'orientation s'exerce de deux manières :

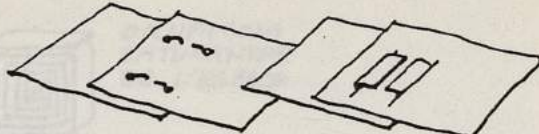
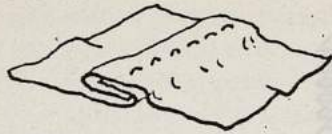
- Par des distributions rotatoires déjà observées dans les nœuds et qui peuvent à l'occasion organiser des superpositions imbriquées autobloquantes.



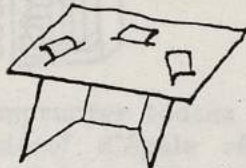
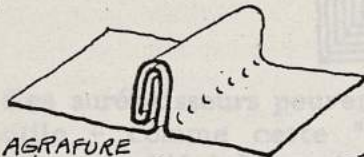
- Par la constitution d'angles dièdres qui déterminent des reliefs saillant/reentrant, tantôt pénétrants, tantôt contenant.



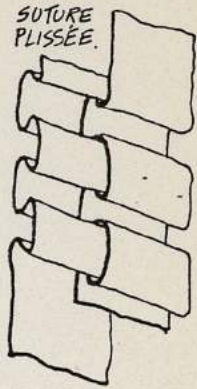
Telles des parois moulantes dont les faces s'épousent intimement, ces classiques jeux de positif/négatif (male/femelle) réalisent des engrenages solidarissants, ou bien toute autre espèce de préhension :



REPLI UNISSANT DEUX LISIÈRES D'ÉTOFFE. - AGRAFES LINÉAIRES OU EN BANDE.



AGRAFURE RÉUNISSANT DEUX PIÈCES DE TÔLE. PATYES DE FIXATION. REPLIS D'ACCROCHAGE.



SUTURE PLISSÉE.

12 ACCUMULATION

12.1 Effet de massivité par repliage

Indépendamment de sa substance, la quantité de matériau utilisée (c'est lui qui résiste) est malgré tout une donnée capitale en matière de construction.

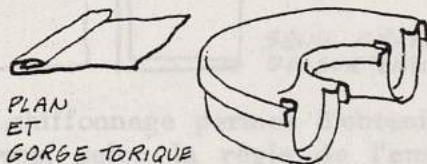
Or, dès qu'apparaît la quantité, se pose nécessairement le problème de savoir comment la répartir judicieusement, et d'autant plus impérativement que l'on en dispose que faiblement.

Les principales stratégies de forme - et donc de distribution spatiale efficace - ont déjà été évoquées au travers des infinis parcours possibles que trace le pli. Il s'est essentiellement agi de libérer l'espace en retirant ici pour ajouter là, dans une quête d'optimisation du rapport quantité de matériau utilisé/dimension de l'espace construit pour une résistance donnée.

Rassembler, accumuler de la matière est encore une possibilité du pliage, consécutive aux propriétés d'applicabilité des surfaces qui découle de leur déformabilité (à savoir qui ne se superposent exactement que les emplacements qui possèdent la même courbure totale).

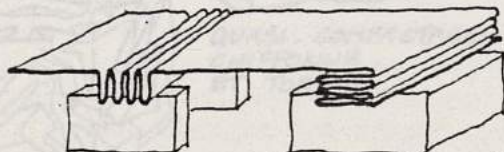
Cette condition ne se réalise parfaitement localement par pliage que si l'on plie la surface au long de ses géodésiques (cf. "Caractéristiques géométriques des domaines développables"). Il en résulte des surépaisseurs simples ou multiples qui constituent des renforts tenus ou épais, au gré des nécessités.

- Ourlets disposés aux limites souvent fragiles d'une surface.



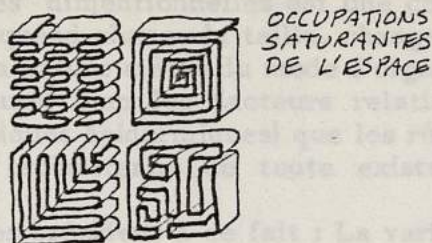
PLAN ET GORGE TORIQUE OURLÉS PAR PLIAGE GÉODESIQUE.

- Nervuration intermédiaire d'inertie, cales d'écrasement, ou simples remplissages.

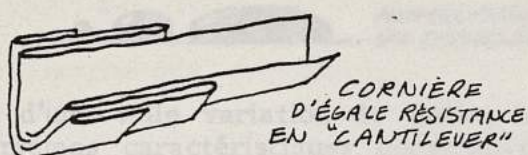


CONCENTRATIONS DE MATIÈRE STRUCTURANTES

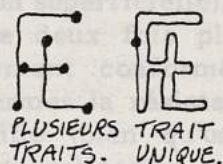
Les façons de composer ces masses par plis parallèles sont innombrables, tout autant que les parcours d'un trait continu ou discontinu qui veut saturer une étendue, dont découlent des effets d'anisotropie en rapport avec le degré d'ordre emprunté.



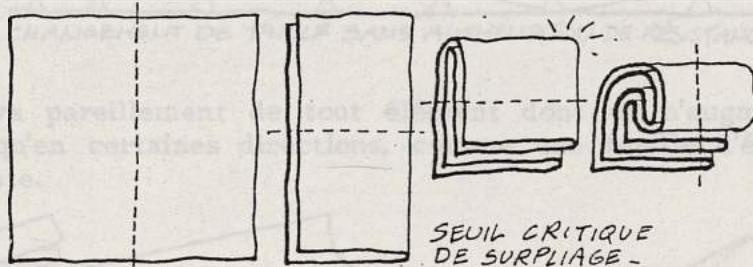
Ces surépaisseurs peuvent emprunter toutes formes de résistance utile - comme cette "cornière" d'égale résistance en flexion, ou ce profilé à âme mince - où la matière s'accumule aux emplacements les plus sollicités.



Noter que le dédoublement d'épaisseur permet de réaliser d'un seul tenant n'importe quel recouplement de figures simples, que l'on aurait pas pu initialement parcourir en continu.



Les épaisseurs feuilletées par surplisages successifs d'un matériau non plastique (pas de la pâte à modeler) sont limitées, précisément à cause des transferts considérables de matière qu'imposeraient très rapidement les surépaisseurs obtenues : tenter de plier consécutivement plus de dix fois n'importe quelle étendue peu extensible!...



Plus aisément le chiffonnage permet d'obtenir des compactages de densités diverses, selon la règle de l'empilement compact, modalité usuelle et extrême de structuration de la matière.

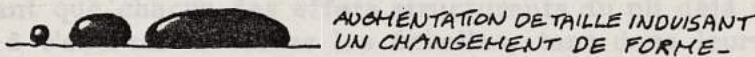


13.1 Variation de taille et modification structurale

Le fait que certains registres de formes n'apparaissent que dans certaines "fourchettes" dimensionnelles est une constante morphologique universelle : quand change la taille, change nécessairement la proportion, voire la nature même du mode d'organisation.

Ce principe régit aussi bien les facteurs relationnels (tels que les échanges énergétiques épidermiques) que les réalités structurales, qui assurent la subsistance de toute existence matérielle, inerte ou vivante.

Deux raisons connexes président à ce fait : La variation du rapport surface/volume décroît linéairement en fonction d'une augmentation de la longueur - c'est-à-dire que la masse croît beaucoup plus rapidement que l'aire qui l'enveloppe.

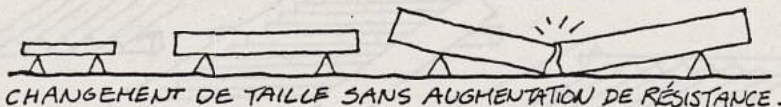


Lors d'une telle variation de taille, le matériau, qui conserve les mêmes caractéristiques constitutives, n'augmente donc pas sa résistance.

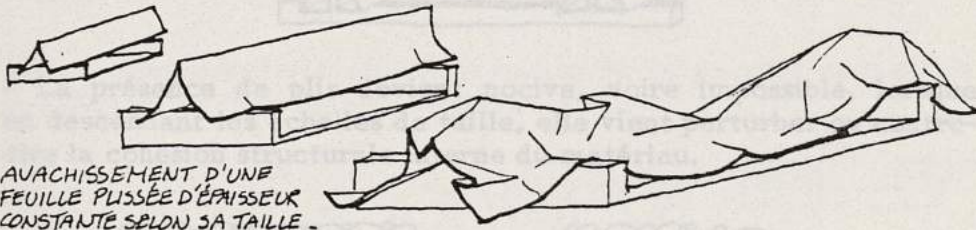
Aussi un élément, dont le travail est principalement assuré par la périphérie est-il particulièrement conditionné par cette règle (comme les formes de goutte d'eau pesante dont la cohésion est assurée par la tension superficielle).

Ainsi, lorsqu'on dispose deux fois plus de matériaux selon une construction semblablement conformée, la résistance n'est pas doublée. En d'autres termes la résistance n'augmente pas proportionnellement à la taille (bien qu'un surcroît de matière soit un facteur évident de consolidation, mais qu'il faut alors disposer différemment).

Aussi, un élément dont on n'augmente que la taille en vient inéluctablement à se rompre sous l'effet de son propre poids.

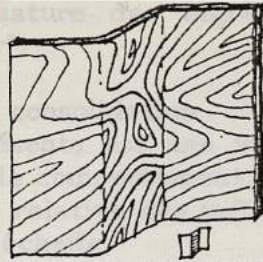


Il en va pareillement de tout élément dont on n'augmente la taille qu'en certaines directions, comme une feuille d'épaisseur constante.



Il résulte que l'on ne peut transposer directement à d'autres tailles les comportements structuraux que l'on peut apprécier à certaines échelles que moyennant une modification de matériau, dont il faut apprécier convenablement les rapports de résistance et les correspondances de comportement sous l'effet des divers

types de contraintes en présence. Alors seulement peut-on valablement faire des analogies entre la validité d'un système structural observé sur une maquette réduite et ses performances à une autre échelle de réalisation.



PARAVENT AGRANDI DE PAPIER EN CONTREPLAQUÉ

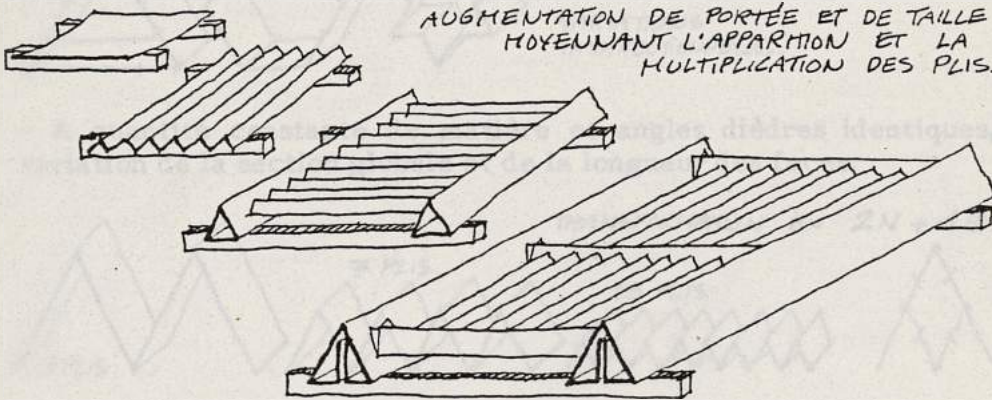
13.2 Fourchette d'efficacité du pli

Aux restrictions près des considérations qui précèdent, il s'avère cependant que chacun des effets structurants du pli déjà analysés trouve à s'exercer à toutes les échelles, tant dans leurs effets affaiblissants que consolidateurs ou mécaniques, dans un jeu extrêmement subtil de macro et de micro plis que favorise leur grande richesse de règles d'agencement spatial.

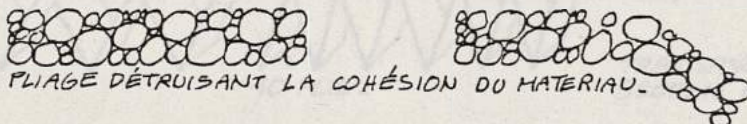
Hormis les évidentes commodités d'usage ou volontés expressives, seules les caractéristiques d'un matériau déterminent la limite au-delà de laquelle il devient absurde d'introduire la complexité du pli.

- Cette présence de plis est d'autant plus nécessaire que dans un souci d'optimisation du rapport quantité de matière/résistance, on atteint des tailles importantes - et où la dépense de matériau devient rapidement considérable.

- La présence de plis devient inutile pour les petites tailles, lorsqu'un élément d'une "finesse" donnée suffit à assurer la performance demandée.



- La présence de plis devient nocive, voire impossible, lorsque en descendant les échelles de taille, elle vient perturber ou contredire la cohésion structurale interne du matériau.



En substance, la complexité structurale (étymologiquement la présence de plis) croît nécessairement avec une augmentation de taille. Et l'effet d'échelle, qui, par définition, concerne priori-

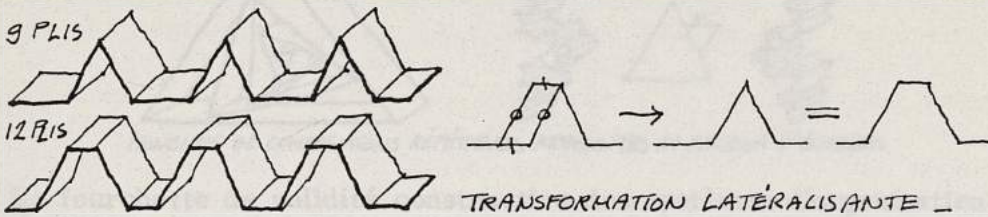
tairement le quantitatif, régit aussi le qualitatif puisque une modification de taille, qui modifie le comportement, peut amener à employer une toute autre stratégie de composition. La pertinence d'un système (structural) réside donc dans cette adéquation entre la nature des ingrédients, leur quantité, et la façon de les "cuisiner".

13.3 Quantité de plis et consolidation

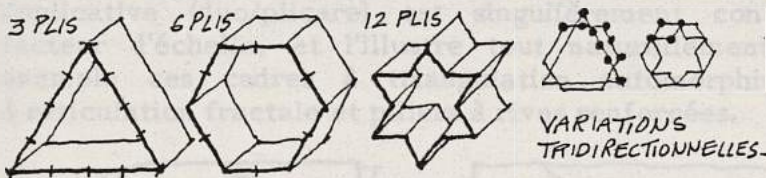
Le nombre de plis présents est une variable qui intéresse à la fois le qualitatif (type de comportement d'une structure) et l'aspect quantitatif (importance relative des influences) et qui est indirectement lié au facteur d'échelle.

Cet aspect est délicat à traiter en toute pureté parce que cette variation du nombre de plis fait nécessairement interférer des paramètres divers, ce qui, pour une constante établie, amène à faire intervenir des données composites, difficiles à comparer, comme les jeux suivants :

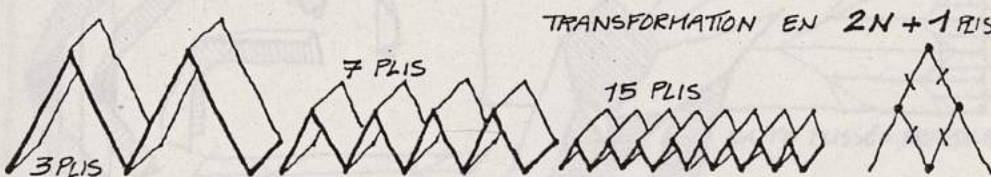
- A quantité égale de matière et constance de la section globale, variation de l'angle des plis et des longueurs de face.



- A quantité constante de matière, variation de la section de base, des angles de pli et des longueurs de face.



- A quantité constante de matière et angles dièdres identiques, variation de la section globale et de la longueur des faces.



- A section globale identique, variation de la quantité de matière, des dièdres et des longueurs de faces, etc...



S'il est facile d'apprécier par l'expérience ou le calcul les différences de résistance de chacune de ces variations, il est inexact d'interpréter ces changements comme résultant uniquement

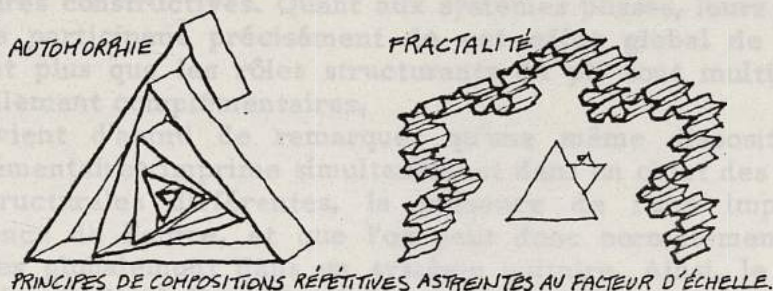
de l'augmentation du nombre des plis. Puisque cela modifie l'effet de refend, l'inertie, la directionnalité etc..., le jeu du nombre ne peut être compris isolément et implique la référence aux données précédemment décrites.

13.4 Pliage, échelle et automorphie

Une raison usuelle veut qu'en réponse à un même problème, on propose (par économie) le même genre de solution (dès lors que celle-ci s'est avérée valable). Ainsi, procède la nature, par reproduction/répétition d'éléments identiques.

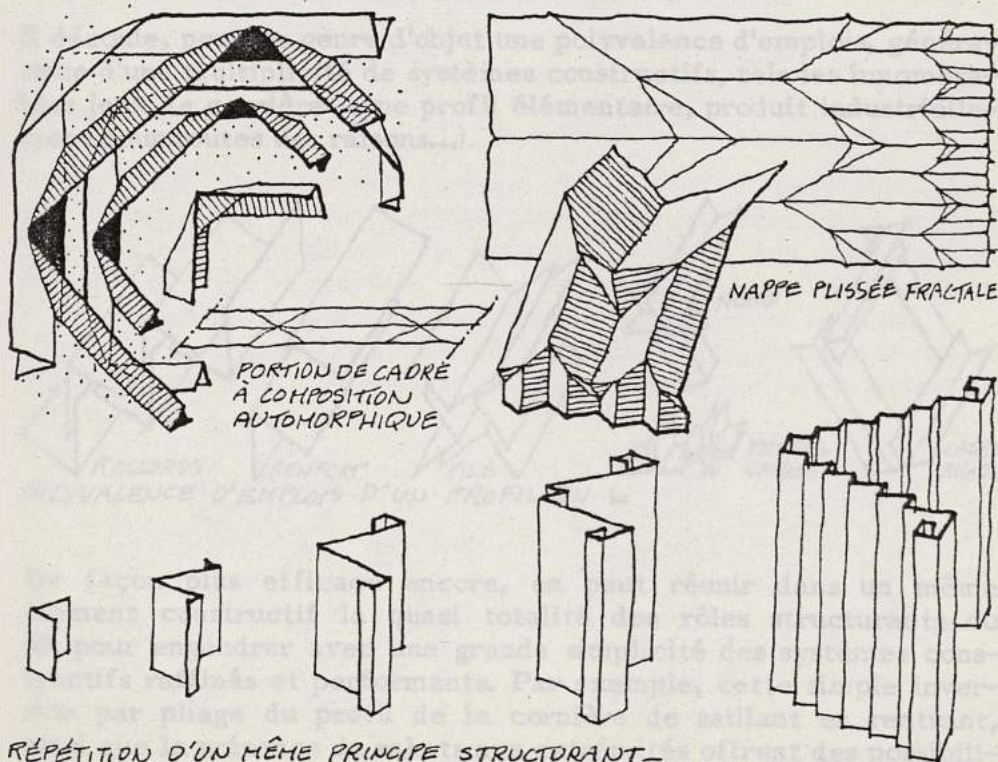
Lorsque cette répétition participe à la croissance d'un objet et induit une modification de taille, le principe morphologique d'échelle opère nécessairement par changement des proportions du support (telle la croissance d'un arbre).

Il en va semblablement des principes de composition automorphique (connexions établies sur une construction qui réengendre sa propre forme).



La fourchette de validité constructive des systèmes d'organisation fractale est pareillement concernée par ces considérations, ainsi que toute situation où la structuration se réalise par approche répétitive.

Or, le pliage qui, par essence possède des facultés de reproduction duplicative (duo/plicare) est singulièrement concerné par ce facteur d'échelle, et l'illustre tout naturellement, comme par exemple ces cadres à triangulation automorphique, berceaux à réticulation fractale et piliers à rives renforcées.



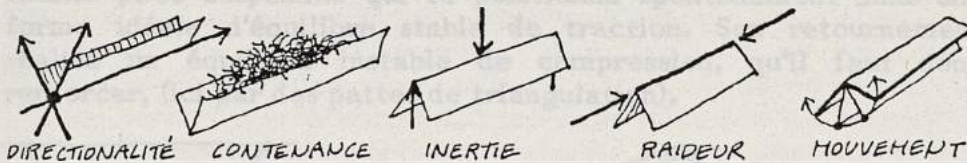
14.1 Coopération d'effets s'impliquant mutuellement

En quelque domaine que l'on observe, il faut considérer la forme comme résultante de l'interaction de différents facteurs.

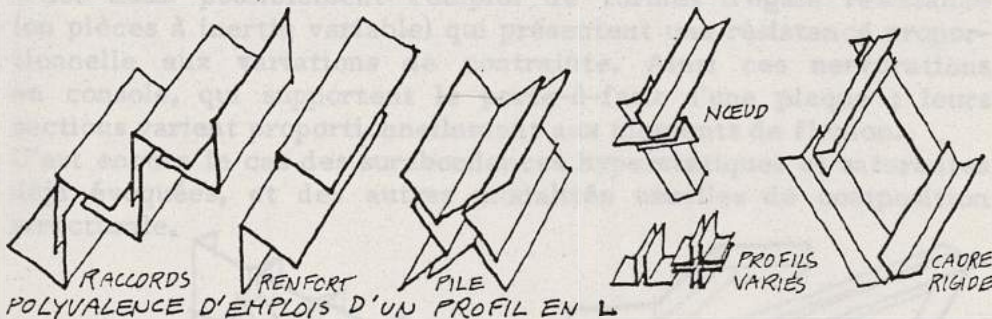
La stabilité, la permanence de ces formes, sont d'autant plus grandes que les multiples variables qui participent à leur constitution concourent avec redondance à la production d'un même résultat. Et l'on constate régulièrement que la propriété d'un tout s'avère plus performante que la simple addition de ses constituants, de telle sorte que la cohérence de l'ensemble en vienne même à conditionner localement le fonctionnement de certaines parties.

Ces observations générales, qu'il conviendrait de caractériser selon le système considéré, trouvent aussi leur réalité dans les structures constructives. Quant aux systèmes plissés, leurs performances participent précisément de cet effet global de forme, d'autant plus que les rôles structurants du pli sont multiples et naturellement complémentaires.

Il convient d'abord de remarquer qu'une même disposition de plis élémentaires imprime simultanément dans un objet des aptitudes structurales différentes, la présence de l'une impliquant l'existence de l'autre, et que l'on peut donc normalement faire coopérer globalement dans un système unitaire. Ainsi, le simple pliage longitudinal d'une "bande" octroie conjointement une orientation qui prédispose à des contenances imbriquantes, une inertie en flexion, une raideur en compression, une bidirectionnalité préférentielle, une mécanique d'ajustement...

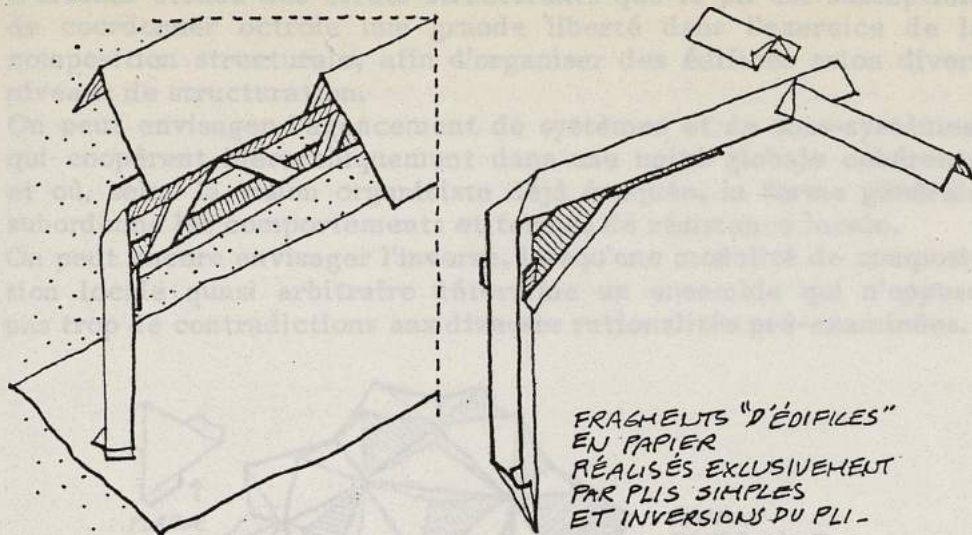


Il découle, pour ce genre d'objet une polyvalence d'emplois, génératrice d'une multiplicité de systèmes constructifs, tels les innombrables jeux de cornière (type profil élémentaire, produit industriellement pour toutes ces raisons...)



De façon plus efficace encore, on peut réunir dans un même élément constructif la quasi totalité des rôles structurants du pli pour engendrer avec une grande simplicité des systèmes constructifs raffinés et performants. Par exemple, cette simple inversion par pliage du profil de la cornière de saillant en rentrant, ainsi que la présence de rabats aux extrémités offrent des possibili-

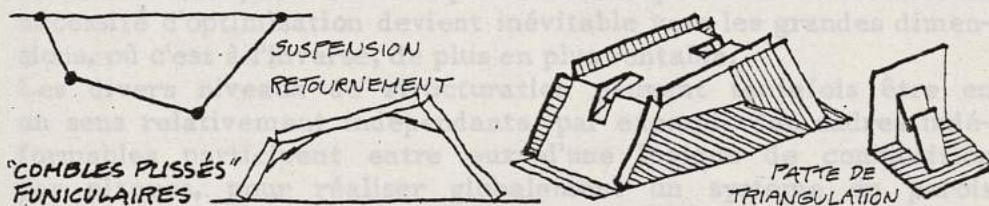
tés diverses, comme pour ces espèces de portiques, obtenus par pliage et raccordement de portions de "bandes".



14.2 Intervention d'autres effets structurants

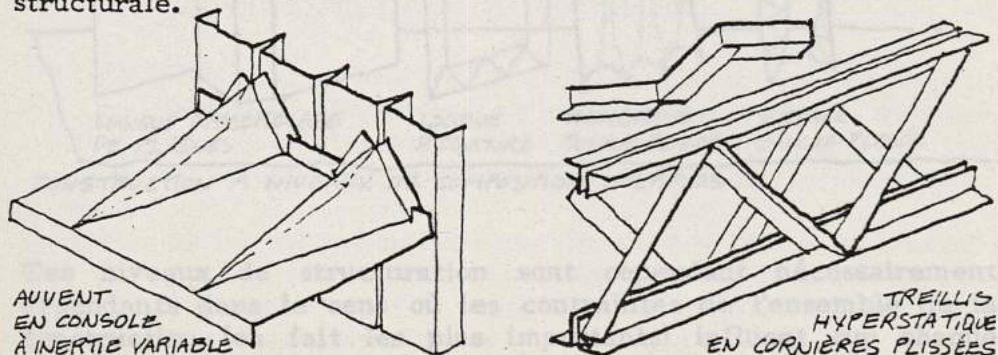
Selon cette optique d'accumulation d'effets consolidateurs différents, il est loisible (et recommandé) d'emprunter des principes de composition qui n'appartiennent pas en propre au pliage, mais que celui-ci articule aisément étant donnée la souplesse de mise en œuvre qu'il procure.

C'est prioritairement le principe des formes funiculaires et antifuniculaires (dispositions stables ou instables d'équilibre des forces en présence, qui aménagent un travail normal éliminant les contraintes de flexion nuisibles aux éléments minces). Ainsi cette feuille pliée suspendue qui se positionne spontanément dans une forme idéale d'équilibre stable de traction. Son retournement réalise un équilibre instable de compression, qu'il faut donc renforcer, (ici par des pattes de triangulation).



C'est aussi possiblement l'emploi de formes d'égale résistance (ou pièces à inertie variable) qui présentent une résistance proportionnelle aux variations de contrainte. Ainsi ces nervurations en console, qui supportent le porte-à-faux d'une plaque ; leurs sections varient proportionnellement aux moments de flexion.

C'est encore le cas des surabondances hyperstatiques et saturantes déjà évoquées, et des autres modalités usuelles de composition structurale.

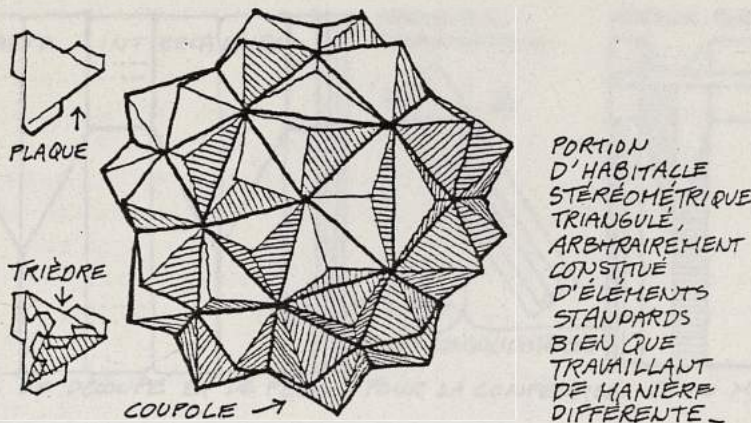


14.3 Conjugaison des multiples niveaux de structuration

L'arsenal étendu des effets structurants que le pli est susceptible de coordonner octroie une grande liberté dans l'exercice de la composition structurale, afin d'organiser des édifices selon divers niveaux de structuration.

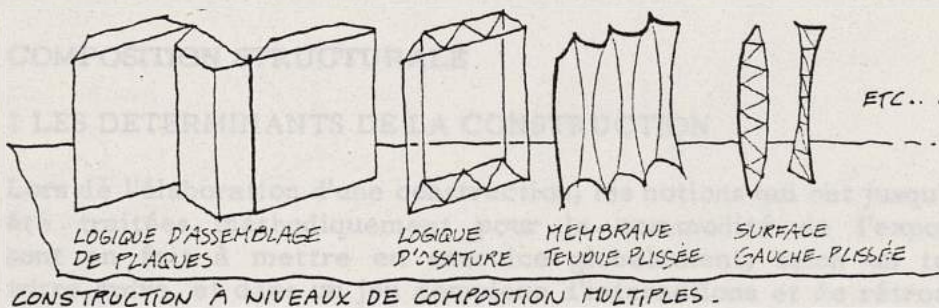
On peut envisager l'agencement de systèmes et de sous-systèmes, qui coopèrent hiérarchiquement dans une unité globale cohérente et où, selon la vision organiciste déjà évoquée, la forme générale subordonne les comportements et formes de résistance locale.

On peut encore envisager l'inverse, lorsqu'une modalité de composition locale quasi arbitraire détermine un ensemble qui n'oppose pas trop de contradictions aux diverses rationalités pré-examinées.



C'est une nécessité d'autant plus impérieuse de faire coopérer (synergiquement) plusieurs niveaux de structuration pour les grandes tailles, en vertu du principe d'échelle qui édicte que les formes et systèmes changent selon la taille du construit : s'il importe peu qu'une tasse soit une forme idéale de résistance (ce ne serait pas "économique" au sens pécunier du terme) la nécessité d'optimisation devient inévitable vers les grandes dimensions, où c'est à l'inverse, de plus en plus rentable.

Les divers niveaux de structuration peuvent toutefois être en un sens relativement indépendants, par exemple des cadres indéformables participent entre eux d'une logique de composition par plaques, pour réaliser globalement un système en parois plissées. Ces cadres peuvent être localement construits selon une logique d'ossature (éventuellement en cornières plissées). Ces cadres peuvent sous-tendre un épiderme (d'autant plus résistant que plissé).

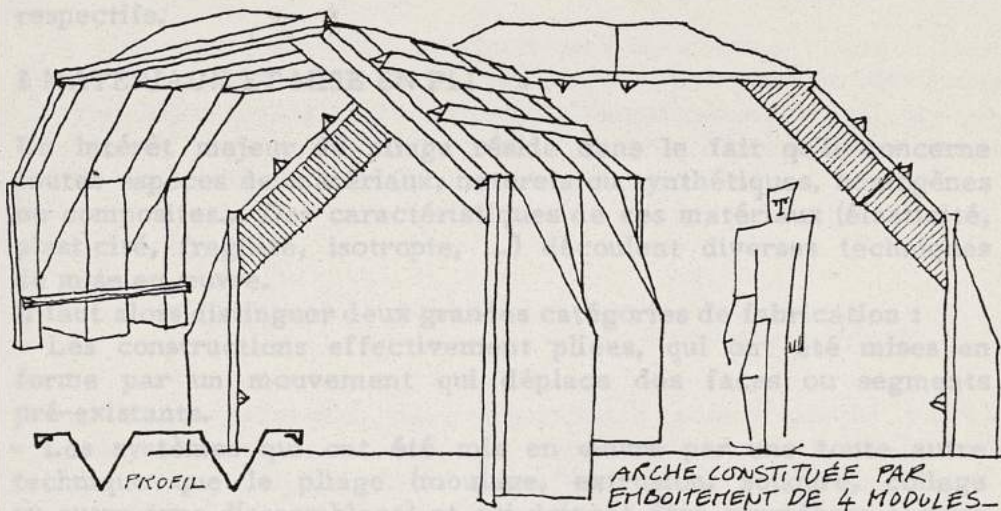
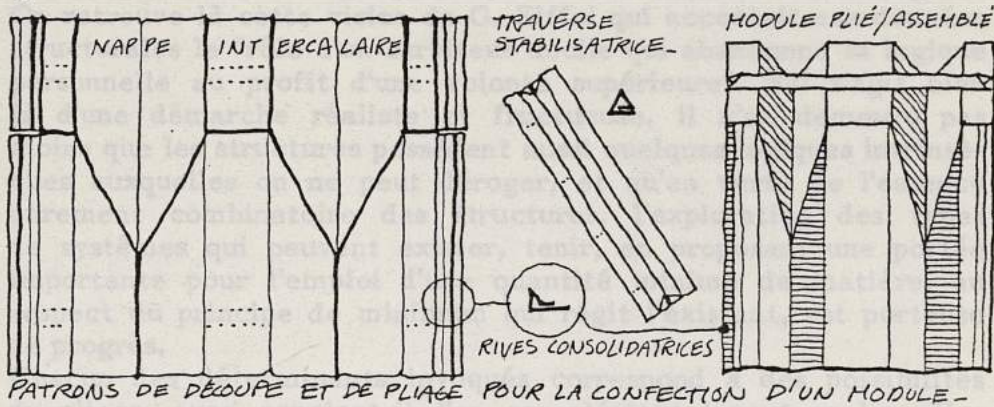


Ces niveaux de structuration sont cependant nécessairement dépendants dans le sens où les contraintes de l'ensemble de la construction (en fait les plus importants) influent sur chaque

constituant dès lors qu'il a quelque utilité. Il est pourtant indispensable que des accidents locaux, minimes, ne mettent pas l'ensemble en péril.

Abandonnons désormais les constructions plissées en papier : l'évocation de leurs performances (que l'on obtient avec un matériau relativement tenu) n'avait pas d'autre objectif que de faire pressentir les prouesses, qu'en vertu des mêmes principes, on peut à fortiori réaliser avec des matériaux beaucoup plus résistants et moyennant des aménagements appropriés.

Voici par exemple une construction pliée qui présente la transposition directe d'un édicule étudié sur modèle en papier, et qui a été réalisé à grande échelle sur des feuilles de carton ondulé.



COMPOSITION STRUCTURALE

1 LES DETERMINANTS DE LA CONSTRUCTION

Lors de l'élaboration d'une construction, les notions qui ont jusqu'ici été traitées méthodiquement pour la commodité de l'exposé, sont en fait à mettre en exercice globalement, selon un tout autre ordre, et dans un jeu complexe d'interactions et de rétroactions.

Il résulte de leurs combinaisons une diversité extrême de possibilités, qui ne constituent toutefois que des données secondaires quant à l'établissement d'un parti structural, qu'il faut assujettir à des critères plus déterminants.

Il peut s'agir des matériaux, de leur technique de mise en œuvre, des principes et systèmes structuraux employables, des fonctions constructives, des processus de production... Apparaît à ce jeu une richesse encore plus grande de combinaisons, proposant un registre de solutions extrêmement nuancé pour répondre à un problème posé. Il résulte encore qu'il n'y a pas une réponse unique et idéale, mais des catégories de possibilités cohérentes, celles qui ne présentent que peu de contradictions dans un conflit d'exigences différentes.

Ce doivent donc être des impératifs encore supérieurs qui déterminent les choix structuraux, principalement les destinations fonctionnelles, les choix esthétiques, les exigences expressives (et bien sûr le contexte géographique et les données économiques). On retrouve là cette vision de G. Eiffel qui accordait aux données structurales le "rôle d'un serviteur docile qui abandonne sa logique personnelle au profit d'une volonté supérieure". S'il s'agit bien là d'une démarche réaliste et fructueuse, il n'en demeure pas moins que les structures possèdent aussi quelques logiques intrinsèques auxquelles on ne peut déroger, et qu'en vertu de l'essence purement combinatoire des structures, l'exploration des types de systèmes qui peuvent exister, tenir, en proposant une portée importante pour l'emploi d'une quantité minime de matière, au respect du principe de minimum qui régit l'existant, est porteuse de progrès.

Chacun des déterminants invoqués correspond à des possibilités du pliage, aussi convient-il d'en caractériser davantage les rôles respectifs.

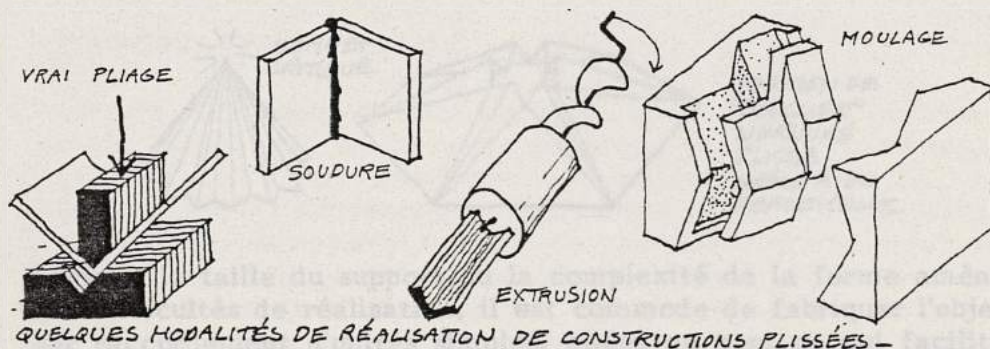
2 MATERIAUX ET MISE EN PLI

Un intérêt majeur du pliage réside dans le fait qu'il concerne toutes espèces de matériaux, naturels ou synthétiques, homogènes ou composites... Des caractéristiques de ces matériaux (élasticité, plasticité, fragilité, isotropie, ...) découlent diverses techniques de mise en œuvre.

Il faut alors distinguer deux grandes catégories de fabrication :

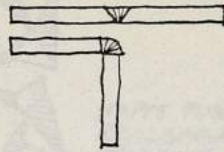
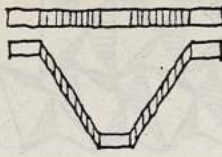
- Les constructions effectivement pliées, qui ont été mises en forme par un mouvement qui déplace des faces ou segments pré-existants.

- Les systèmes qui ont été mis en œuvre par une toute autre technique que le pliage (moulage, extrusion, soudure, collage ou autre type d'assemblage) et qui doivent être considérés comme apparentés aux structures plissées parce qu'ils en présentent les caractéristiques spatiales et structurales.



Le pliage stricto sensu est une technique de mise en forme économique, car il n'exige que peu de transferts de matériaux (en regard

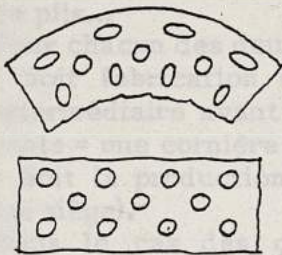
de l'emboutissage) et ne nécessite donc qu'une dépense d'énergie minime.



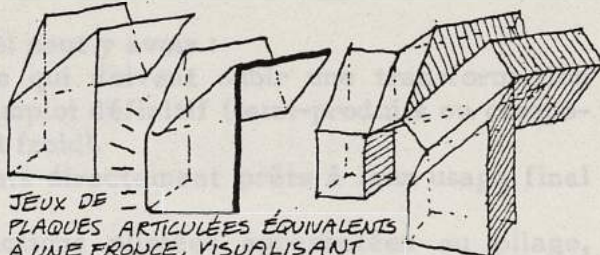
IMPORTANCE RELATIVE
DES ZONES DE
TRANSFERT DE
MATÉRIAU ENTRE
EMBOUTISSAGE
ET PLIAGE -

La réalisation est élémentaire et immédiate, (en tous cas pour les plis simples, même si cela demande parfois des dispositifs moins sommaires que le simple rabattement sur un établi, comme des presses hydrauliques, trains de galets, etc...)

Cela concerne prioritairement les éléments minces, linéaires, (brins, tiges, tubes...) ou en feuilles, plaques ou films.



DÉFORMATIONS AU SEIN
D'UNE MASSE SOUPLE PLIABLE.



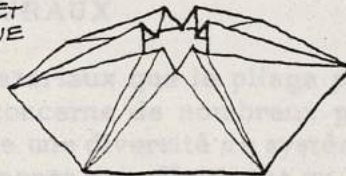
JEU DE
PLAQUES ARTICULÉES ÉQUIVALENTS
À UNE FROUCE, VISUALISANT
L'IMPORTANCE DES TRANSFERTS DE MATÉRIAU
DANS UN PLIAGE COMPOSÉ DE PIÈCES ÉPAISSES.

Les éléments épais sont aussi pliables si, comme l'indique bien l'origine du mot sub/plicare, ils sont souples (mousses) ou plastiques (pâtes). Sinon il faut qu'ils subissent à l'emplacement du pli quelque traitement physique ou chimique qui en modifie le comportement (chaleurs, vibrations par ultrasons, imprégnations...).



TRAITEMENTS
PRÉDISPOSANT AU PLIAGE.

Pour cette catégorie de constructions effectivement pliées, les emplacements de convergence des plis posent, par leur accumulation même, d'autant plus de problèmes qu'ils y sont nombreux. Une solution assez élégante peut en certains cas consister à faire un trou à l'emplacement du sommet, ce qui, d'une certaine façon, supprime ou bien reporte le problème.



PORTION DE
"BOUCLIER"
NERVURÉ
PLISSÉ
GRÂCE À UN
PERCEMENT.

Lorsque la taille du support ou la complexité de la forme amène des difficultés de réalisation, il est commode de fabriquer l'objet par raccordement d'unités simples, pliées ou non, ce qui facilite la construction, autorise des tailles importantes, diversifie le vocabulaire formel et renvoie éventuellement aux possibilités des systèmes plissés suivants.



NAPPE PLISSÉE PLUS AISÉMENT RÉALISABLE PAR RACCORDEMENT DE MODULES QUE PAR PLIAGE CONTINU.

Dans le deuxième cas, celui des constructions plissées apparentées aux systèmes pliés, le répertoire des matériaux concernés est extrêmement vaste et les limites des systèmes plissés difficiles alors à cerner (puisque le moulage "monobloc" et surtout les raccords d'éléments disparates ne connaissent guère de limitations formelles). Il n'apparaît même plus dans ce cas de restrictions quant aux sommets, tailles, nombres ou dispositions de plis...

Pour chacun des deux cas, il peut y avoir :

- Soit fabrication d'objets qui doivent subir une transformation intermédiaire avant leur emploi définitif (semi-produits ou composants = une cornière pliée à froid).
- Soit la production d'objets directement prêts à leur usage final (un siège).

Dans le cas des constructions plissées apparentées au pliage, il y a possibilité de réduire les opérations de transformations intermédiaires, en passant directement du matériau brut à sa structure définitive (coffrage d'un voile mince plissé en béton armé réalisant directement l'intégralité de l'édifice).

Concluons enfin que relativement aux matériaux qu'il peut mettre en œuvre, le pliage présente un intérêt double :

- Parce qu'il présente un principe de résistance par la forme, tant au niveau de la solidité locale d'un objet que pour les performances globales d'une construction.
- Parce que c'est une technique de construction de ces objets (qu'il s'agisse de la fabrication effective, tel que le gaufrage d'une tôle ondulée, qu'il s'agisse d'une simple mise en place comme l'emballage d'un paquet, ou qu'il s'agisse d'un assemblage tel qu'une agrafe...).

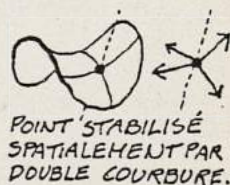
Il n'y a pas lieu de s'étendre davantage sur les données concernant les matériaux et leurs techniques de mise en œuvre, qui seront développées dans le chapitre traitant de la mise en pli, et que décrivent divers ouvrages spécialisés.

3 SYSTEMES STRUCTURAUX

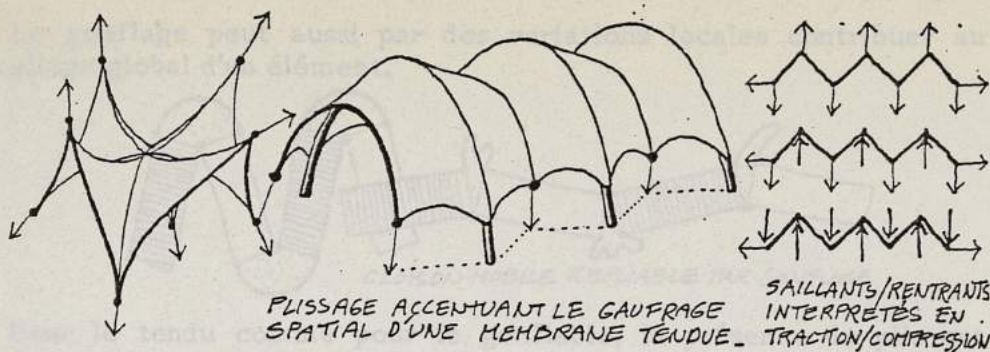
De la diversité des matériaux que le pliage peut mettre en forme découle le fait qu'il concerne de nombreux principes structuraux, qui donnent lieu à toute une diversité de systèmes constructifs.

Cela concerne les éléments qui effectuent un travail de membrane, telles que les structures tendues ou gonflées, dont la courbure constitue le principe primordial de résistance, moyennant ses variations de nature et d'intensité.

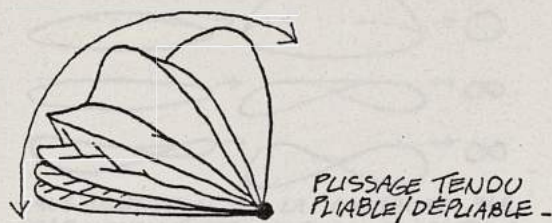
Pour les structures tendues, la double courbure inverse (qui stabilise chaque point de la paroi en plusieurs directions extrêmes de l'espace) est d'autant plus structurée qu'elle s'aménage entre une résille de câbles ou d'arcs qui en augmente le gaufrage spatial.



POINT STABILISÉ SPATIALEMENT PAR DOUBLE COURBURE.

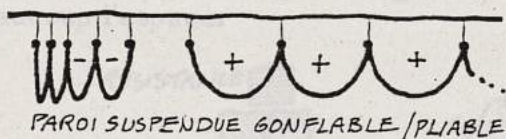
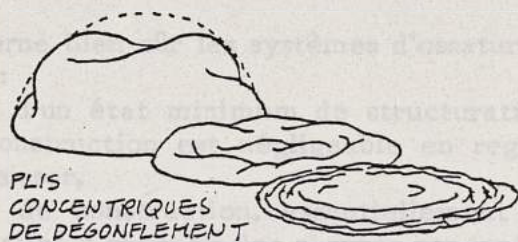


De tels systèmes, qui sont généralement constitués de matériaux souples et légers, se prêtent aisément aux jeux du repliage/dépliage.

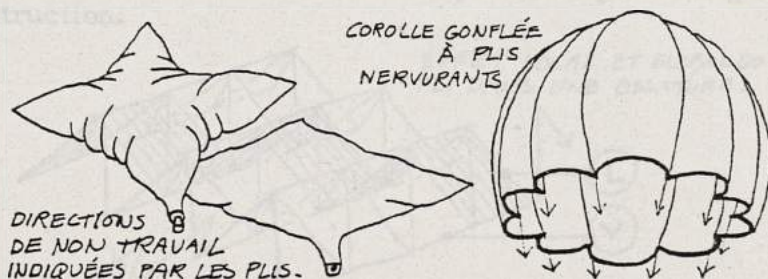


Le gonflable qui, par nature, présente des régimes variables gonflé/dégonflé, emprunte nécessairement des états plissés :

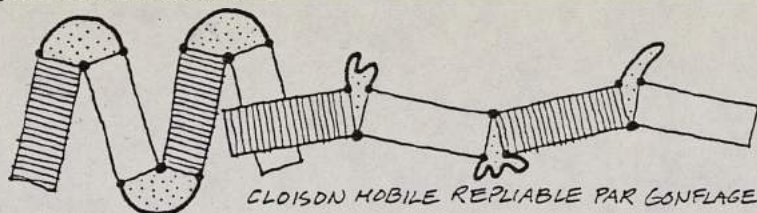
- Soit dans la condition dégonflée du rangement qui permet le transport (les plis sont aussi imposés par l'application de la convexité sur un plan).



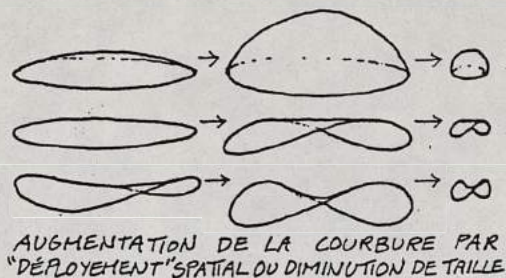
- Soit dans l'état gonflé. Les plis sont nocifs lorsqu'ils correspondent à une direction de non travail de la paroi, comme celle obtenue ici par distorsion du développable en quasi convexité. Les plis sont au contraire structurants lorsqu'ils constituent une nervuration qui accentue localement la courbure de la surface.



Le gonflage peut aussi par des variations locales contribuer au pliage global d'un élément.

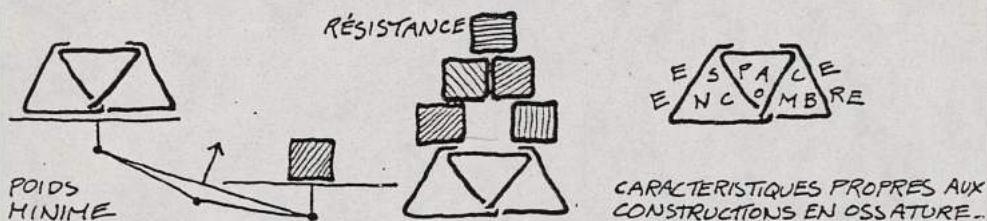


Pour le tendu comme pour le gonflable, la présence de plis est d'autant plus adéquate que la courbure de la surface est faible, c'est-à-dire proche du développable (à moins de renforcer alors le matériau).

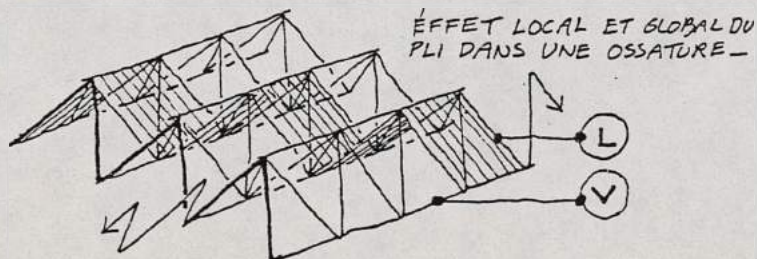


Le pliage concerne bien sûr les systèmes d'ossature, pour lesquels il faut rappeler :

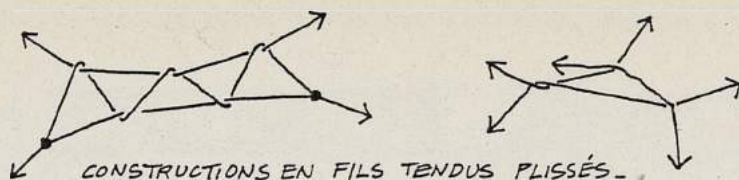
- Qu'il s'agit là d'un état minimum de structuration, où le poids propre de la construction est négligeable en regard des efforts qu'elle peut encaisser.
- Que ce type de construction, essentiellement discontinu, est normalement destiné à recevoir des charges concentrées.
- Qu'en contrepartie des vides qu'ils organisent, ils encomrent malgré tout beaucoup l'espace.



Le pliage intéresse ici la résistance locale des membrures, constituées de profilés très divers, ainsi que la disposition globale de la construction.

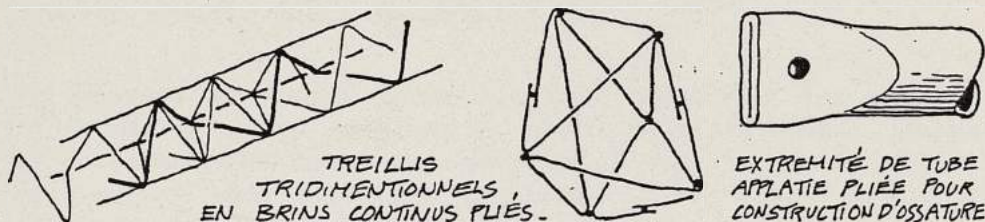


Il faut aussi considérer qu'à certaines échelles d'observation, les résilles de câbles tendus constituent des constructions plissées.



CONSTRUCTIONS EN FILS TENDUS PLISSÉS.

Mentionnons à l'occasion l'univers singulièrement riche de possibilités formelles et techniques que propose le pliage continu d'un objet linéaire pour la réalisation de toute espèce de "carcasse".

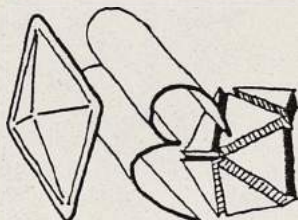


TREILLIS TRIDIMENSIONNELS, EN BRINS CONTINUS PLIÉS.

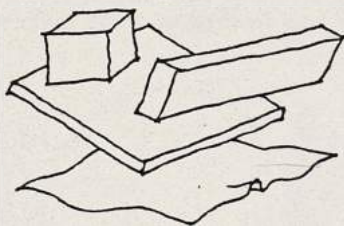
EXTREMITÉ DE TUBE APPLATIE PLIÉE POUR CONSTRUCTION D'OSSATURE

Le pliage concerne bien entendu les coques nervurées, voiles minces plissées, feuilles ployées, ou toute autre construction constituée d'une surface rigide.

Là encore, les formes développables, parce que les moins courbes, sont prioritairement concernées par les effets consolidateurs du pli.

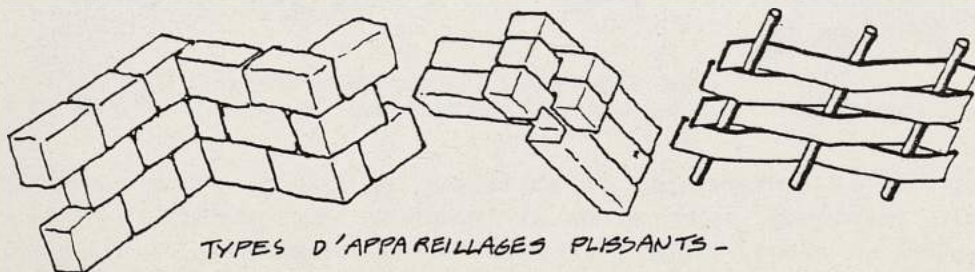


Leur usage est courant parce que la majorité des produits usuels sont fabriqués, débités - ou bien épannelés sous la forme minimale et simple que constitue le plan - qu'il s'agisse de feuilles, films, plaques, planches, blocs.



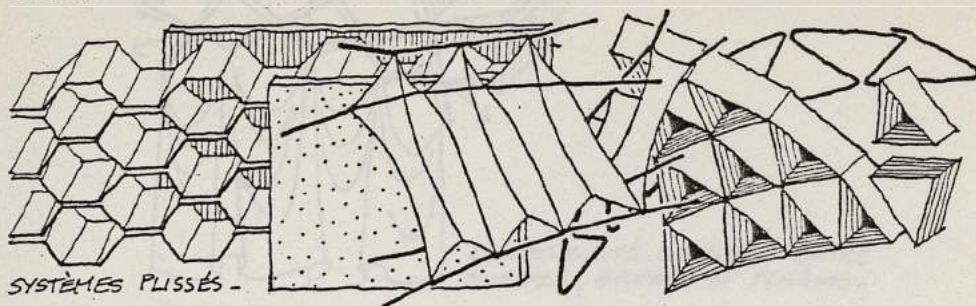
FORMES COURRANTES À LIMITES PLANES PROPICES AUX STRUCTURATIONS À PLOIS

Le pliage concerne pareillement les parois massives, constituées de blocs appareillés, ou les parois légères, constituées de cannages ou autres imbrications.



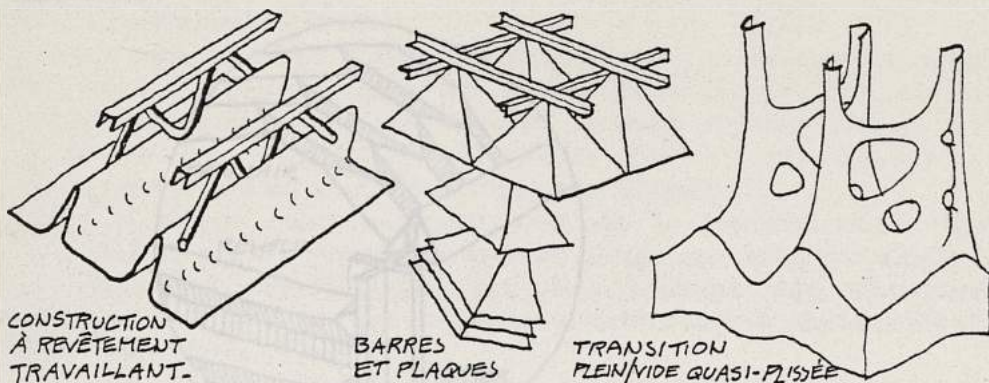
TYPES D'APPAREILLAGES PLISSANTS.

Tous ces principes peuvent donner lieu à des systèmes constructifs homogènes (charpentes en treillis plans ou spatiaux, résilles tendues, appareillages de caissons, panneaux sandwich, parois alvéolaires, etc...).



SYSTÈMES PLISSÉS -

Ils peuvent se marier entre eux pour constituer des systèmes hétérogènes, genre ossature à revêtement travaillant, nappes tridimensionnelles associant plaques et barres, etc... et leur conjugaison peut aménager la transition entre des épaisseurs massives, des dispositions lamellaires puis des ossatures réticulaires.

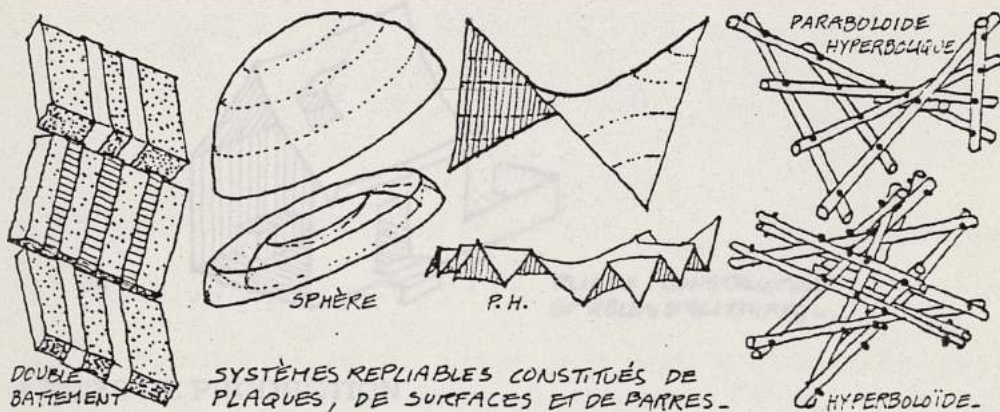


CONSTRUCTION
À REVÊTEMENT
TRAVAILLANT.

BARRES
ET PLAQUES

TRANSITION
PLEIN/VIDE QUASI-PLISSÉE

Un répertoire de constructions très directement impliqué par le pliage consiste dans les systèmes pliables/dépliables. Ceci concerne à la fois les déformations de surfaces souples, les jeux de plaques articulées et les ossatures (ce sont alors prioritairement les mécanismes à degré de liberté restreint, genre pantographe, qui sont usuellement employés).

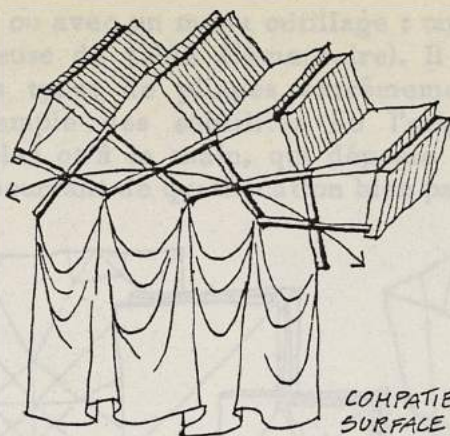


DOUBLE
BATTEMENT

SYSTÈMES REPLIABLES CONSTITUÉS DE
PLAQUES, DE SURFACES ET DE BARRES -

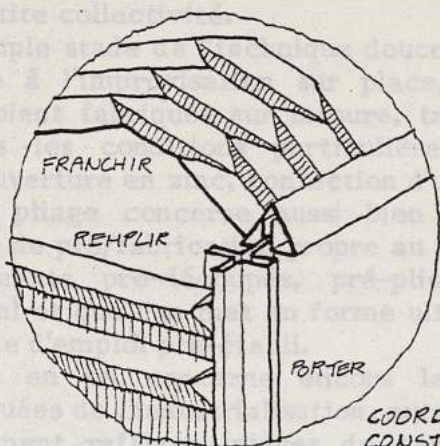
HYPERBOLIQUE

Il faut remarquer que les modalités de déformation de chacun de ces systèmes sont compatibles entre elles, proposant une diversité de mécanismes susceptibles d'accomplir toutes les évolutions du léger/démontable/transportable.



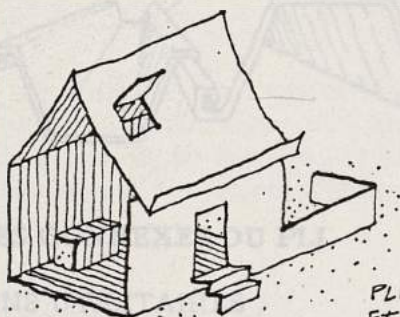
COMPATIBILITÉ DE PLIAGE ENTRE SURFACE, BARRES ET PLAQUES -

La logique de composition de chacun des systèmes évoqués doit aussi être pensée en termes de fonction constructive (éléments porteurs, franchisseurs, enveloppes, remplissages...) pour donner lieu à la réalisation d'éléments de construction (poteaux, murs, poutres, dalles, portiques, charpentes) qui peuvent à l'occasion être conçus comme des jeux de composants standards associables entre eux.



COORDINATION DES FONCTIONS CONSTRUCTIVES EN PLIAGE -

Ces dispositions constructives peuvent enfin être envisagées dans une approche par ouvrages (escaliers, baies, toitures, planchers, etc...) associant alors aux rôles constructifs de l'organisation spatiale ses diverses fonctions utilitaires.



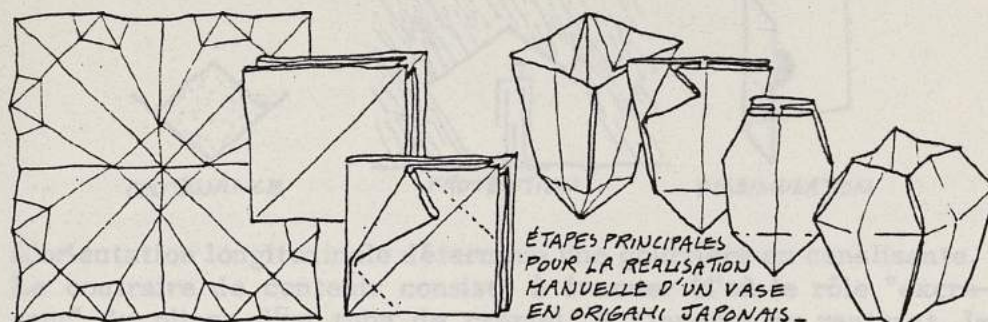
PLIAGE, CONSTRUCTION ET RÔLES UTILITAIRES -

4 VOIES DE PRODUCTION

D'un point de vue technologique, la mise en pli est intéressante parce qu'elle recouvre l'intégralité des voies de production :

- Cela concerne "l'auto-construction" d'éléments que l'on fabrique par soi-même avec des moyens rudimentaires (directement à

la main ou avec un menu outillage : on a très vite fait de fabriquer une plieuse de table élémentaire). Il convient de remarquer que certains types de pliages extrêmement élaborés (ceux relevant par exemple des subtilités de l'origami) ne sont précisément réalisables qu'à la main, qui dépasse là toute espèce d'outil sans exiger pourtant de qualification bien particulière.

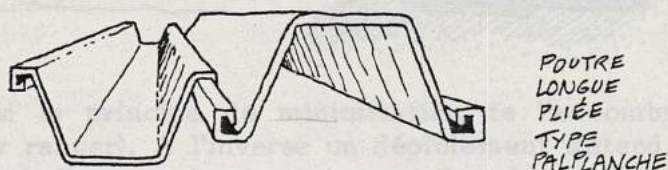


A ce même niveau d'équipement modeste, ou légèrement plus élaboré, ou bien de personnel sans formation spéciale, on peut concevoir des modalités de production artisanale, individuelle ou de petite collectivité.

A ce simple stade de "technique douce" chère à certains, le pliage se prête à l'improvisation sur place, de telle manière que les objets soient fabriqués sur mesure, trouvant réponse "sur le tas" à toutes les conditions particulières d'ajustement (réalisation d'une couverture en zinc, confection d'un vêtement).

Mais le pliage concerne aussi bien sûr la préfabrication. Une modalité de pré/fabrication propre au pliage concerne par exemple les éléments pré-découpés, pré-pliés (comme des emballages en carton) et que l'on met en forme ultérieurement, conformément à un mode d'emploi pré-établi.

La mise en pli concerne encore les techniques extrêmement sophistiquées de l'industrialisation, autorisant la production d'objets extrêmement raffinés (pièces de carrosserie automobile) ou de dimensions imposantes, (des presses hydrauliques plient usuellement des tôles d'acier de 1 cm d'épaisseur sur 5 m de long). Elle se prête alors aux avantages de l'industrialisation, qui donne lieu à la production en chaîne de séries standards.



PROPRIETES CONNEXES DU PLI

1 FONCTIONS UTILITAIRES

La richesse des usages du pliage tient aussi à ce que, en tant que procédé de mise en forme, il procure à l'objet, en même temps que des aptitudes constructives, l'ensemble des autres capacités de la forme à accomplir simultanément plusieurs rôles.

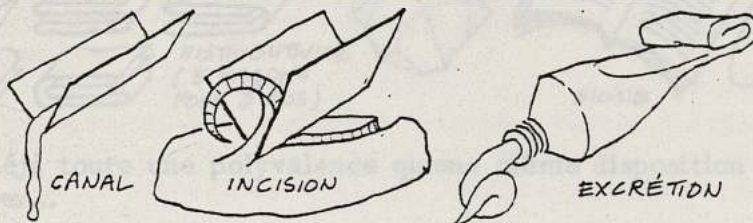
Ce sont là encore les dispositions spatiales qui sont déterminantes, et aux caractéristiques géométriques fondamentales déjà analysées sous le jour de leurs implications structurales, correspondent

les principales propriétés premières par la combinaison desquelles découlent diverses fonctions associées.

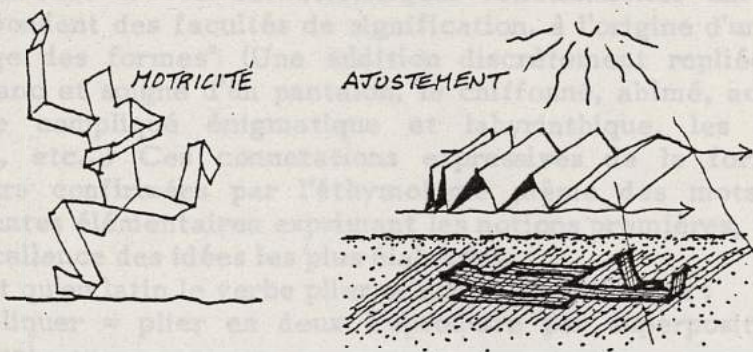
Par exemple l'orientation transversale (concavité/convexité qui correspond au rentrant/saillant), procure une faculté de contenance, corollaire d'abri protecteur dissimulateur et défensif.



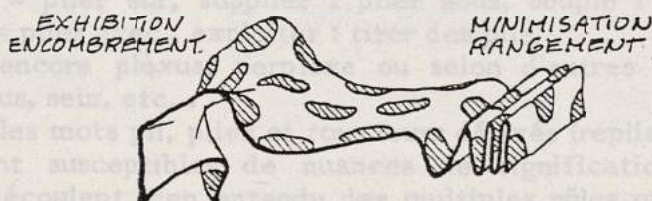
L'orientation longitudinale détermine une gouttière en canalisante. Le contraire de contenir consiste à évacuer (d'où le rôle "excréteur" du pliage d'un tube de crème). A l'inverse du rentrant, le saillant engendre l'incisif, pénétrant, le coupant, agressif...



De la mécanique articulaire découlent des rôles de motricité, tantôt active (geste, signe, croissante...), tantôt passive (souplesse d'ajustement aux conditions changeantes du milieu).

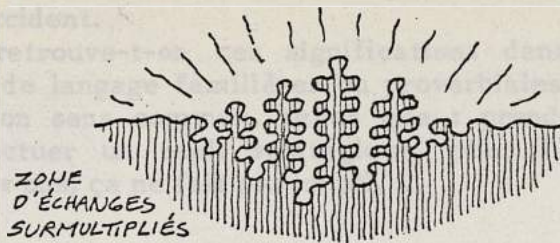


Vient aussi le principe de minimisation de l'encombrement (on replie pour ranger). A l'inverse un déploiement s'étend, encombre et s'approprie l'espace, se montre, et au besoin agresse (un papillon déploie brusquement ses ailes, exhibant des motifs qui effraient le prédateur).

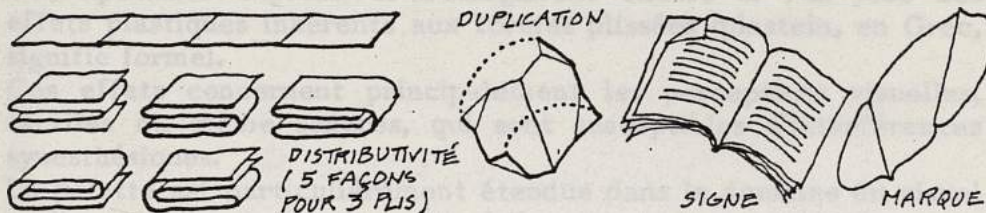


La multiplication est une prolifération qui peut déterminer une occupation spatiale débordante, augmentant les échanges énergéti-

ques entre les milieux (humidité, lumière, son, chaleur, ...) pour contribuer à un métabolisme (parois de radiateur ou d'intestin)...



Le pliage est par sa continuité distributif et ordonné (un mètre pliant, une carte routière). Il est reproducteur par duplication. Il est encore marqué sur un objet, mémoire des actions, etc...



Voilà déjà toute une polyvalence qu'une même disposition parvient à assurer...

2 SIGNIFICATION

En référence à ces caractéristiques fonctionnelles universelles correspondent des facultés de signification, à l'origine d'un certain "langage des formes" (Une addition discrètement repliée, le pli net, franc et soigné d'un pantalon, le chiffonné, abîmé, accidenté, usé, le compliqué énigmatique et labyrinthique, les zig-zags indécis, etc...) Ces connotations expressives de la forme sont d'ailleurs confirmées par l'éthymologie même des mots, unités signifiantes élémentaires exprimant les notions premières, vecteurs par excellence des idées les plus élaborées.

Sachant qu'en latin le verbe plier se dit plicare, il vient :

- Du/pliquer = plier en deux (reproduire par superposition d'où ré/plique)

Simple = sans pli, le contraire de com/plexe = avec des plis.

Du/plexe = double (plié en deux, comme la longue feuille d'un di/plome). Multi/plier, c'est plier plusieurs fois.

Com/plicité = plié avec, ou pris dans les plis, comme im/pliquer.

Im/pliqué = compris dans les plis, l'inverse d'ex/pliquer et d'ex/pli-citer.

Appliquer = plier sur, supplier : plier sous, souple : sous le pli, employer = plier avec, exploiter : tirer des plis.

Viennent encore plexus, perplexe ou selon d'autres racines que latines sinus, sein, etc...

D'ailleurs les mots pli, plier et tous leurs dérivés (replier, déployer, etc...) sont susceptibles de nuances de signification diverses, sens qui découlent bien entendu des multiples rôles que le pliage peut exercer. Pour le seul verbe plier on trouve, en correspondance à ses rôles transformateurs, conditionneurs voire destructeurs, les acceptions suivantes : former, incliner, rabattre, fermer,

soumettre, assujétir, abaisser, obéir, accommoder, habituer, résigner, faiblir, céder, fuir, reculer, fausser, abîmer ...

Au pli sont associés les sens de marque, surépaisseur, message, enveloppe, accident.

Aussi bien retrouve-t-on ces significations dans les locutions et tournures de langage familières ou proverbiales, qui expriment un certain bon sens commun, telles que : prendre le pli, plier bagage, effectuer un repli stratégique, plier l'échine, je plie mais ne romps pas, ça ne fait pas un pli, ...

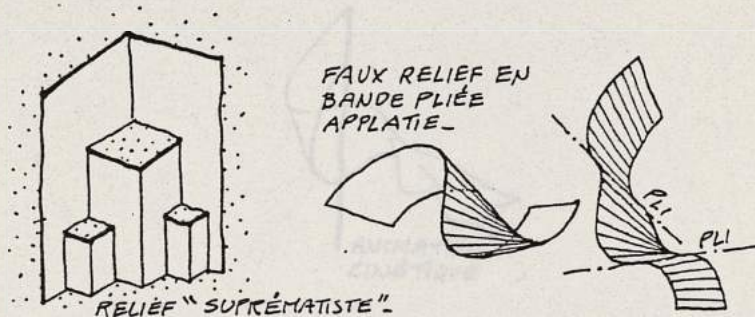
3 EXPRESSION PLASTIQUE

Ces aptitudes expressives s'élargissent encore si l'on joue des effets plastiques inhérents aux formes plissées (plastein, en Grec, signifie forme).

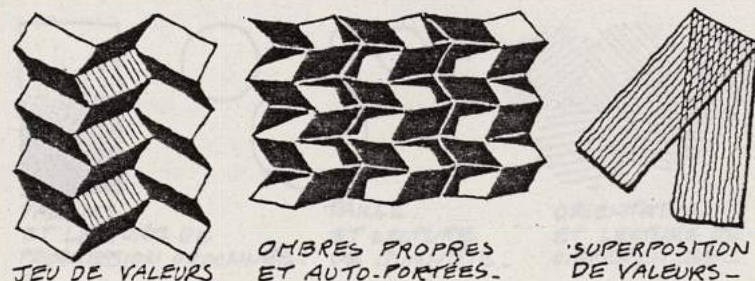
Ces effets concernent principalement les perceptions visuelles, tactiles ou même sonores, qui sont susceptibles d'interférences synesthésiques.

La palette est particulièrement étendue dans le domaine du visuel ou l'on peut, par pliage, mettre à l'exercice chaque variable sensible dont il est possible de jouer pour établir des contrastes de forme, qui affirment les qualités épidermiques d'un support :

- Relief tridimensionnel avec jeux de saillant/ rentrant, positif/négatif, spatialité "aplatie"...



- Les "jeux" de valeur selon les angles d'incidence de la lumière, assortis d'ombres propres et portées, transparences, translucidités ou opacités selon les surépaisseurs.



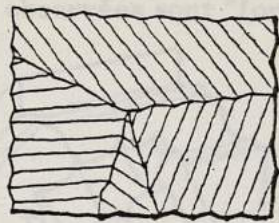
- Les chatoyements de couleur par reflet ou polarisation selon l'inclinaison des faces.

- Les textures plus ou moins fines par fragmentation en micro et macro plis, ordonnés ou désordonnés.

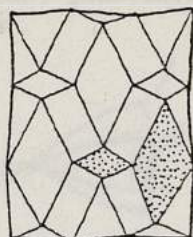
- Les systèmes d'orientation de lignes continues ou brisées, parallèles, rayonnantes ou enveloppantes.
- Les rapports de taille selon l'étendue des faces, organisant des jeux de proportion.



TEXTURE DE FROISSAGE -



MOTIF REPLIABLE À CONTRASTE D'ORIENTATION



MOTIF REPLIABLE À CONTRASTE DE TAILLE

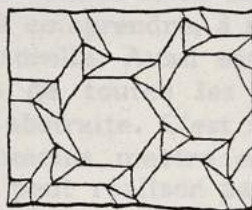
- Les variations de forme par la nature des plis (raideur du rectiligne, souplesse du curviligne) et de découpe des facettes.

CONTRASTES DE FORME...



PAR LA NATURE DES COURBES -

PAR LA DÉCOUPE DES FACETTES (MOTIF REPLIABLE)

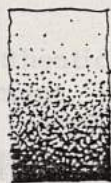


- Les animations cinétiques selon toutes sortes d'évolutions élémentaires ou contournées, progressives ou soudaines, lentes ou rapides.

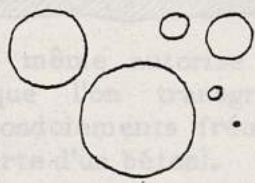


ANIMATION CINÉTIQUE

Or, chacune de ces variables est potentiellement porteuse de sens : les valeurs sont susceptibles d'exprimer un ordre, les tailles une quantité, les orientations des différences ... autant de données qui contribuent à des facultés sémiologiques pour communiquer un discours abstrait.



VALEURS ET LECTURE DE PROGRESSION ORDONNÉE.



TAILLE ET LECTURE DE QUANTITÉ.



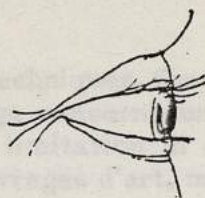
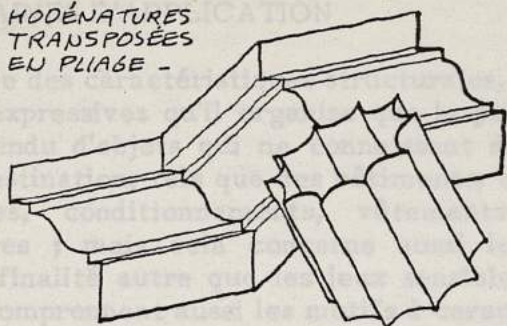
ORIENTATION ET LECTURE DE DIFFÉRENCES -

Ces lisibilités, qui concernent en fait tout le visuel, sont singulièrement fortes pour les systèmes plissés : ils donnent lieu à des formes extrêmement prégnantes puisque la perception est d'autant plus évidente que les contrastes sont affirmés, ce que réalise

le pliage qui procède par ruptures franches (il est aussi dans les possibilités du pliage de souligner avec redondance les lignes qui dessinent un objet).

Ces aptitudes expressives sont enfin en correspondance directe avec le sentiment d'harmonie, qui est d'autant plus intense que les structures formelles observées sont "fortes".

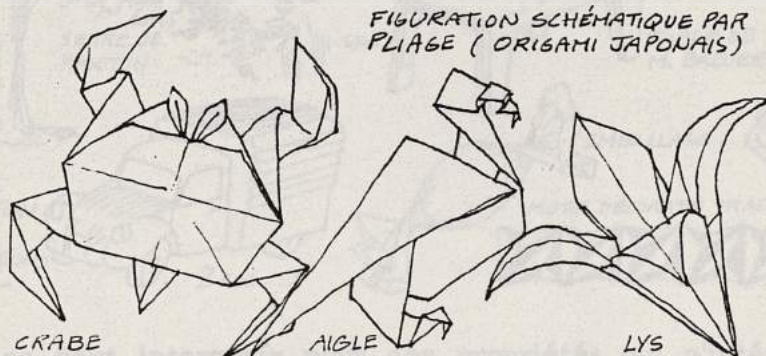
HODÉNATURES
TRANSPOSÉES
EN PLIAGE -



PLIS ACCOMPAGNANT,
DESSINANT ET
SOULIGNANT
LA FORME -

Ainsi le pliage est une véritable écriture de l'espace et de la matière, une structuration sculpturale des formes selon une modénature parlante, qui donne à percevoir, à comprendre, à ressentir au moyen d'une procédure "vraie" et naturelle. Aussi est-ce une technique de représentation susceptible de toutes les nuances expressives, réalistes (l'origami) ou bien abstraite. C'est un mode de figuration "objective" qui peut néanmoins mettre en scène les artifices trompeurs du paraître (on peut réaliser par pliage les principales catégories d'"illusion" visuelle).

FIGURATION SCHEMATIQUE PAR
PLIAGE (ORIGAMI JAPONAIS)

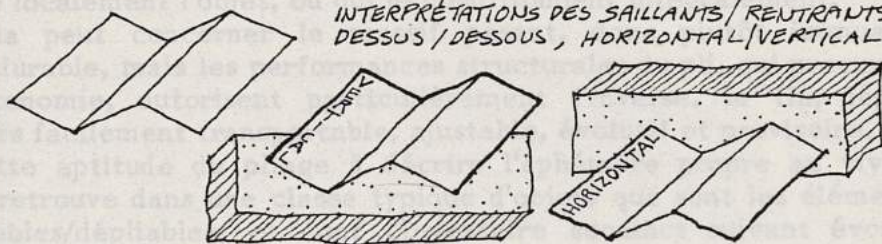


CRABE

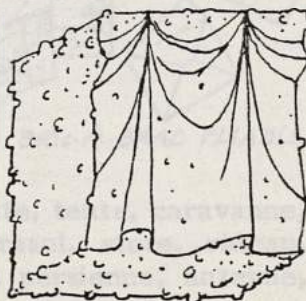
AIGLE

LYS

INTERPRÉTATIONS DES SAILLANTS / RENTRANTS
DESSUS / DESSOUS, HORIZONTAL / VERTICAL -



Son "authenticité" même autorise enfin des effets surprenants, précisément lorsque l'on transgresse délibérément certaines de ses "vérités" (ondoiements frémissants d'une voile empreints dans l'épaisseur inerte d'un béton).

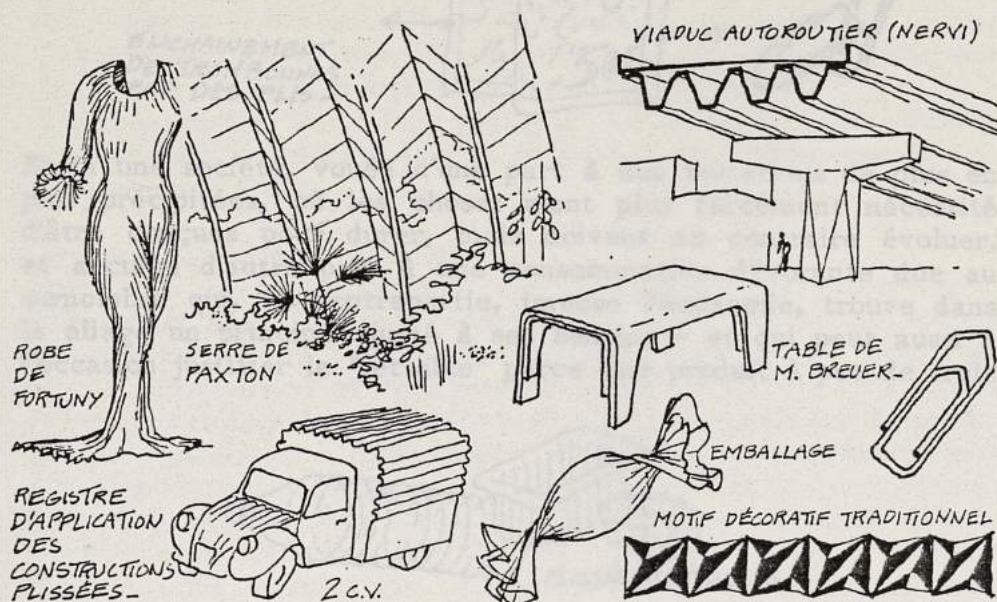


FORME CAPTURÉE PAR MOULAGE.

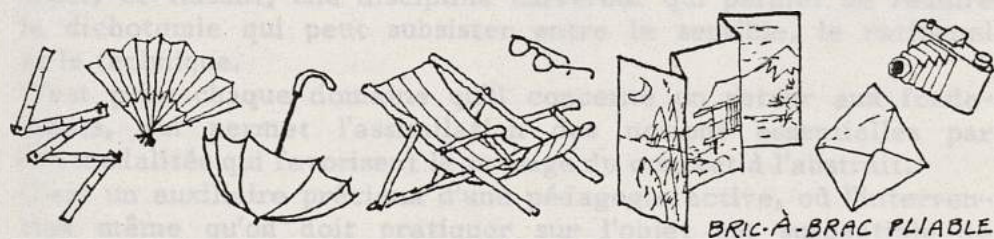
Etant donné sa situation aux frontières du graphique et du sculptural, le pliage a toujours tenu une place d'honneur dans les arts plastiques, surtout dans les périodes de retour aux fondements de l'expression, comme les mouvements récents des Constructivismes, Cinétismes, Support/Surface, etc...

4 DOMAINES D'APPLICATION

Il résulte des caractéristiques structurales, techniques, fonctionnelles et expressives qu'il organise que le pliage concerne un univers très étendu d'objets qui ne connaissent de limitation ni de taille ni de destination, tels que des bâtiments, ouvrages d'art, mobiliers, véhicules, conditionnements, vêtements et autres ustensiles utilitaires ; mais cela concerne aussi les productions qui n'ont pas de finalité autre que les jeux sensibles et signifiants de l'art, et qui comprennent aussi les motifs à caractère décoratif.



Le pliage peut intervenir pour des propriétés qui n'intéressent que localement l'objet, ou qui le conditionnent intégralement. Cela peut concerner le massif pesant, donc plutôt immuable et durable, mais les performances structurales du pli, qui procurent l'économie, autorisent particulièrement l'inverse, le fin, léger, alors facilement transportable, ajustable, évolutif et provisoire. Cette aptitude du pliage à décrire l'éphémère propre au vivant se retrouve dans une classe typique d'objets que sont les éléments pliables/dépliables, et dont l'inventaire succinct suivant évoque la richesse :

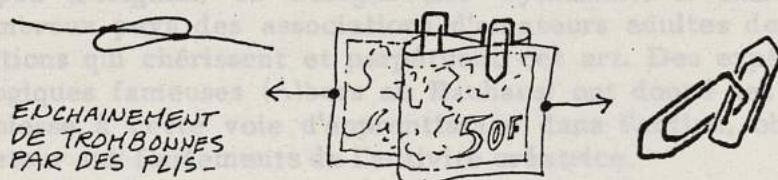


- Tréteau, vélo, siège, table, chapeau, poucette, tente, caravanne, lit de camp, draps, échelle, parapluie, parasol, store, rideau, capote, auvent, barrière, cloison, paravent, persienne, antenne,

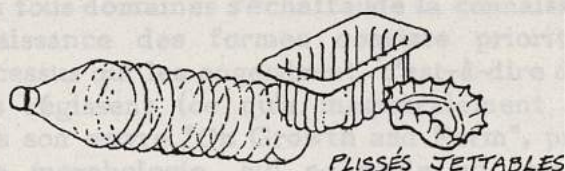
pantographe, carte routière, carton à dessin, canne d'aveugle, aile, voile, emballage, éventail, couteau, ciseaux, mètre pliant, portefeuille, lampion, soufflet, accordéon, sac, lunettes, compas, billet de banque, panneau de signalisation provisoire, carnet de tickets ...

On observe en ces "géométries variables" l'accomplissement des comportements obligés de la vie et de ses respirations périodiques telles que les alternances actif/passif, veille/repos, ouvert/fermé, protégé/exposé, installé/transporté, employé/rangé, etc...

Il existe de plus dans les jeux du pliable/dépliable une dimension à la fois ludique et merveilleuse, liée aux fascinations qu'amènent régulièrement les métamorphoses du vivant (livres "à programme" pour les enfants). Cette magie atteint parfois la mystification (bien des tours de prestidigitation procèdent par "trucs" de pliage).



Enfin une société, vouée d'une part à des mutations de plus en plus précipitées, où les choses n'ont plus forcément nécessité d'être conçues pour durer, mais doivent au contraire évoluer, et acculée d'autre part à une consommation dévorante due au surnombre qui, en contrepartie, impose l'économie, trouve dans le pliage un principe ajusté à ses besoins - et qui peut aussi à l'occasion justifier le "jetable" parce que produit à peu de frais.



5 ROLES PEDAGOGIQUES

Le pliage est une activité qu'il importe d'étudier pour les savoir faire qu'il procure en vue d'applications pratiques. Il résulte de la diversité des sujets auxquels il touche que c'est conjointement une excellente voie pour instruire séparément certains domaines de connaissance (mathématiques, arts plastiques, construction)...

C'est, ce faisant, une discipline carrefour qui permet de réduire la dichotomie qui peut subsister entre le sensible, le rationnel et le technique.

C'est pour chaque domaine qu'il concerne un retour aux fondements, qui permet l'assimilation des notions essentielles par des modalités qui favorisent le passage du concret à l'abstrait.

C'est un auxiliaire précieux d'une pédagogie active, où l'intervention même qu'on doit pratiquer sur l'objet est susceptible de réduire le blocage face à l'action et qui entretient, catalyse l'exercice de la créativité. Il s'instaure un dialogue direct entre la pensée et l'action au travers d'une production concrète qui, obligeant à l'objectivité, permet d'observer assez immédiatement

la validité d'une hypothèse, qu'il s'agisse d'une mise en scène tangible de la réalité ou d'une représentation abstraite transposable à d'autres situations.

Etant donné que cela concerne chaque niveau de connaissance - rudiments élémentaires, notions élaborées et problématiques de recherche, c'est un exercice qu'il est fructueux d'effectuer du plus jeune âge au plus avancé. C'est une activité praticable à chaque instant et en tous lieux, sur les supports les plus courants.

Sans doute est-ce pour ces raisons, assorties du fait que le pliage est une activité ludique, et un passe temps inventif accessible dès le plus jeune âge, que celui-ci est dans certains pays un moyen d'éducation (des écoles de pliage existent au Japon, dans les pays nordiques...). Il fait partie d'activités quasi-folkloriques au Japon (l'origami) en Pologne (les *wycinanki*). Il existe dans de nombreux pays des associations d'amateurs adultes de toutes extractions qui chérissent et perpétuent cet art. Des expériences pédagogiques fameuses (Albers au Bauhaus) ont donné ses lettres de noblesse à cette voie d'apprentissage dans l'action, obligeant à un retour aux fondements de l'activité créatrice.

Précisons encore les vertus pédagogiques du pliage pour chacun des domaines morphologique et structural qui relève spécifiquement de cette étude.

5.1 Point de vue morphologique

C'est dans la reconnaissance des formes ou des "structures", c'est-à-dire dans le discernement d'un ordre parmi les choses que réside une des caractéristiques de l'intelligence ; aussi est-ce par l'observation et l'interprétation de ces formes qu'à toutes échelles et en tous domaines s'échaffaude la connaissance humaine. Or, la connaissance des formes consiste prioritairement dans celle des processus qui les engendrent, c'est-à-dire des transformations qui les régissent (ce qu'a magistralement illustré d'Arcy Thomson dans son œuvre "On Growth and Form", premier ouvrage consistant de morphologie, qui ne parle au demeurant pas de pliage...).

Cette intelligence des transformations (ce qu'il y a de fixe dans un monde changeant) est capitale en ce qu'elle révèle un fonctionnement qui témoigne des corrélations forme/fonction. Et, le pliage est précisément par nature un processus de transformation qui, en tant que tel, est susceptible d'illustrer l'ensemble des problématiques formelles.

Mais la connaissance (en particulier celle des formes) va de pair avec les facultés de re/présentation (la science ne réside que dans le re/productible). Or, le pliage est aussi une modalité de représentation et de modélisation dans toutes les acceptions du terme.

- Il est, bien sûr, présentation et spectacle vivant de lui-même sans aucune autre allusion.

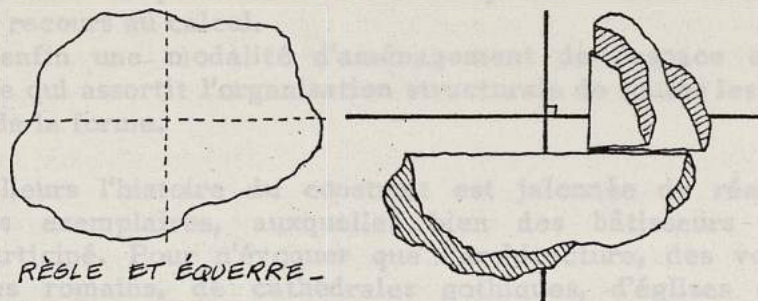
- C'est aussi une figuration schématico/mimétique à la manière de l'origami.

- Il est enfin une évocation abstraite (toutes les données de composition structurale de cette étude sont illustrées sur des modèles en papier, qui ne sont que des simulations de propriétés plus générales).

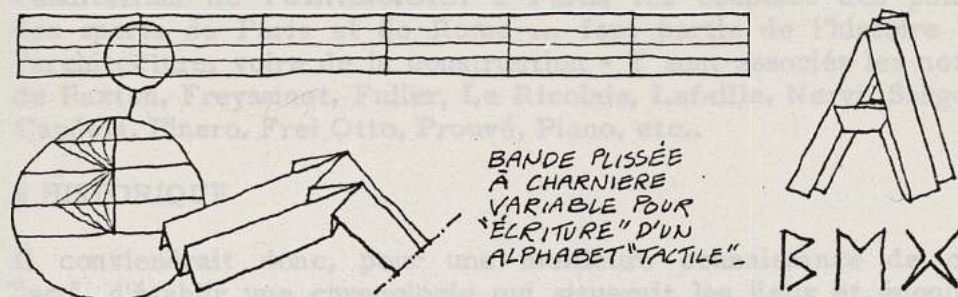
Le pliage est donc une méthode fondamentale de connaissance des formes en tous domaines de l'existant naturel ou artificiel, concret ou abstrait, logique et sensible. C'est aussi un exercice

actif, une pratique manuelle qui peut très tôt développer les notions qui contribuent à la reconnaissance des formes et de leurs effets (facultés d'orientation dans l'espace, mémorisation de séquences de transformation, coordination motrice, précision d'exécution etc...).

C'est à l'occasion une technique de fabrication d'outil (réalisation de règles et équerres à partir de l'informe).



Le pliage constitue aussi une méthode intéressante d'ergothérapie (instruction des non-voyants).



Enfin le pliage, en tant que principe de génération formelle aux règles ennonçables - donc programmables - constituerait en conception assistée sur ordinateur, une modalité intéressante de composition et de représentation des formes, contrôlables dans leurs effets spatiaux, perceptifs, mécaniques et structuraux. Pour autant que sa finalité réside dans une correspondance au réel, cette modalité de représentation de fictions abstraites serait très heureusement complétée et confirmée par la pratique expérimentale sur modèle, mariant là les deux voies extrêmes d'assistance à la conception.

5.2 Point de vue structural

Le pliage est une voie très accessible pour étudier les fondements de composition structurale et pour envisager l'art de construire dans toutes ses rationalités. (Technique de fabrication et de mise en œuvre des matériaux, modalités d'assemblage, principe de résistance à haute performance, mécanique des constructions, systèmes structuraux ...)

C'est une méthode efficace dans les phases de conception qui permet de réduire considérablement la distance qui peut séparer l'imaginé et le réel : c'est un procédé de modélisation peu sophistiqué qui amène à concevoir selon une technique qui correspond très directement au vrai mode de réalisation, autorisant successivement l'esquisse de l'idée, racontée avec trois bouts de papier, la simulation des comportements structuraux et l'interprétation des déformations, la maquette de présentation.

C'est une réalité qui habitue à l'objectivité qui conduit assez naturellement à un dépouillement sans artifice, hors des caprices de la mode (sauf quand il devient lui-même une mode).

Elle intéresse les niveaux de découverte les plus élémentaires ainsi que les stades de conception très élaborés, voire même ultra-spécialisés (il existe des experts en conception d'objets plissés ...

Le pliage permet à tout-un-chacun d'accéder aisément au plus raffiné dans la pertinence d'une composition structurale avant d'avoir recours au calcul.

C'est enfin une modalité d'aménagement de l'espace et de la matière qui assortit l'organisation structurale de toutes les qualités utiles de la forme.

Par ailleurs l'histoire du construit est jalonnée de réalisations plissées exemplaires, auxquelles bien des bâtisseurs illustres ont participé. Pour n'évoquer que l'architecture, des voutes de thermes romains, de cathédrales gothiques, d'églises d'Europe centrale préfigurent les voiles minces plissés actuels. Plus récemment la couverture du Crystal Palace, les hangars pour dirigeables d'Orly, la maison du Peuple à Clichy, la cathédrale de Royan, l'auditorium de l'U.N.E.S.C.O. à Paris, les coupoles des palais des sports de Paris et de Rome ... font partie de l'histoire de l'architecture, voire de la construction - Y sont associés les noms de Paxton, Freyssinet, Fuller, Le Ricolais, Lafaille, Nervi, Sarger, Candela, Pinero, Frei Otto, Prouvé, Piano, etc..

6 HISTORIQUE

Il conviendrait donc, pour une meilleure connaissance de cet "art", d'établir une chronologie qui situerait les lieux et époques où se sont produits des progrès significatifs - (ce qu'esquisse la sélection d'exemples illustrant la rubrique de mise en pli des matériaux).

Contentons-nous d'évoquer ici en raccourci que le pliage s'inscrit dans une évolution universelle qui a d'abord correspondu à l'intervention d'aveugles processus physiques d'activité tellurique.

Il a ensuite fait partie des manifestations instinctives du vivant pour agir sur les choses (des chenilles, des oiseaux plient des feuilles ...)

Le pliage a plus tardivement été parmi les techniques humaines de mise en forme de la matière des plus primitives pour la fabrication d'objets rudimentaires (fibres, peaux, terres...).

Il s'est développé et raffiné au gré de l'évolution de la connaissance, s'implantant dans les lieux où ont été conçus des matériaux appropriés (ainsi, avec le papier inventé en Orient, le pliage est devenu une activité traditionnelle).

Il correspond à des techniques au fait des possibilités d'aujourd'hui et convenant aux nécessités de demain (le pliable dans la conquête de l'espace...).

CONCLUSION

Toutes les considérations esquissées jusqu'ici ont fait entrevoir combien le pliage est une discipline qui, du triple point de vue de la formation technologique, intellectuelle et artistique, intéresse ceux qui, architectes, ingénieurs, designers, plasticiens, participent à la mise en forme concrète de l'espace et de la matière à l'usage de l'homme.

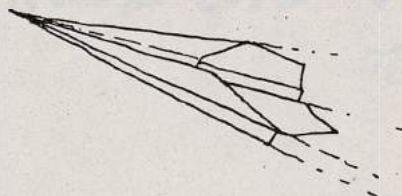
Mais plus qu'un sujet de discours, c'est surtout une activité dont on perçoit l'intérêt par la pratique; aussi, sans plus épiloguer, invitons le lecteur à s'y exercer pour dépasser bientôt les rudiments de ce traité.

Mentionnons enfin que cet essai est en fait un prétexte pour démontrer l'intérêt d'un propos plus général et peu répendu que constitue la Morphologie Structurale (au sein de quoi le pliage ne constitue qu'une infime parcelle) et dont les œuvres des Le Ricolais, Frei Otto et Fuller constituent les meilleurs exemples (Leurs travaux tant théoriques que techniques, artistiques et pédagogiques ont notablement infléchi la production par la voie de l'innovation structurale).

C'est une voie de synthèse qui, traitant des problématiques structurales comme composantes formelles déterminantes puisqu'elles conditionnent l'existence même des choses, fait remonter à l'étymologie des formes, d'où découlent des compréhensions profondes et diverses, que l'on sait dès lors mieux prendre en compte.

C'est une façon de produire du nouveau avec des procédés de toujours en s'ouvrant sur les prospections biotechniques, telle que le pratique actuellement la bionique.

C'est une mine de découverte à exploiter dès lors que l'on désire faire progresser un langage formel limité, en vue d'exprimer des idées de manière plus ajustée et d'exercer avec plus de liberté ses facultés créatrices pour faire évoluer la production.



3

TECHNOLOGIE DU PLIAGE

JEAN-FRANÇOIS BROSSIN

...et par exemple d'exemples où la mise en plis est possible. L'expression technique détermine les possibilités. Dans la peinture ou la sculpture, le pliage des matériaux a une histoire qui est liée à diverses constructions évoquant aussi cette préoccupation.

...comme si elle ne venait apparaître, avec l'arrivée de nouveaux matériaux et une évolution de la technique des systèmes constructifs, une myriade de projets relevant de l'usage qui, pour certains, furent réalisés.

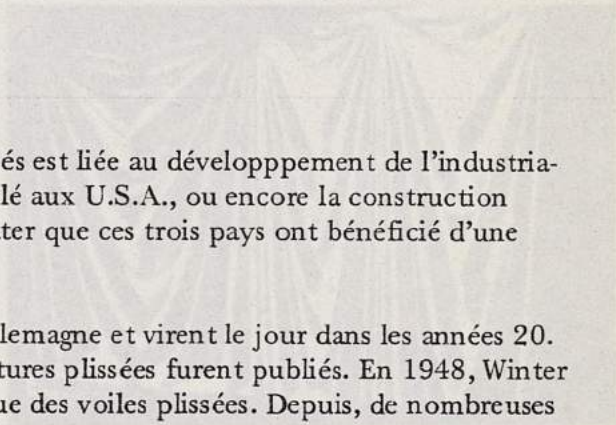
...une multitude de produits, de bâtiments, de véhicules, d'objets, qui furent réalisés par les règles de la mise en plis.



Tôle ondulée (1900)



Maquette d'un pont (1950)



Tronc sculpté dans le quartz - Cathédrale St. Basilien

L'apparition des procédés de fabrication d'éléments plissés est liée au développement de l'industrialisation : les tôles ondulées en Angleterre, le carton ondulé aux U.S.A., ou encore la construction en béton plissé en Allemagne. Il est intéressant de constater que ces trois pays ont bénéficié d'une avance sensible sur les autres pays du monde.

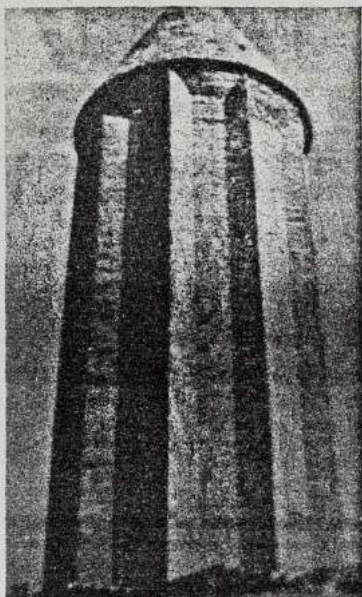
Les premières constructions plissées sont originaires d'Allemagne et virent le jour dans les années 20. C'est aussi l'époque où les principes théoriques des structures plissées furent publiés. En 1948, Winter et Pei publient le premier ouvrage concernant la technique des voiles plissées. Depuis, de nombreuses publications évoquent ce domaine.

Dans le cadre de cette étude, il importe de combler une lacune technico-historique. Ce chapitre est un condensé d'un ouvrage plus vaste intitulé « Traité de mise en plis ».

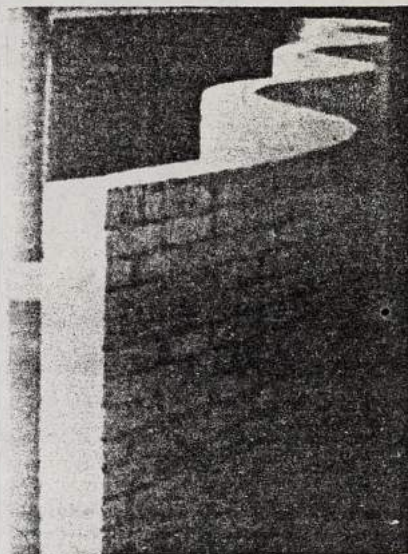
L'histoire est parsemée d'exemples où la mise en plis est présente. L'expression artistique témoigne de ces préoccupations. Dans la peinture ou la sculpture, le drapé des costumes a une présence obsessionnelle. Certaines constructions évoquent aussi cette préoccupation.

Puis le vingtième siècle voit apparaître, avec l'arrivée de nouveaux produits et une évolution de la connaissance des systèmes constructifs, une myriade de projets relevant de l'utopie qui, pour certains d'entre eux, furent réalisés.

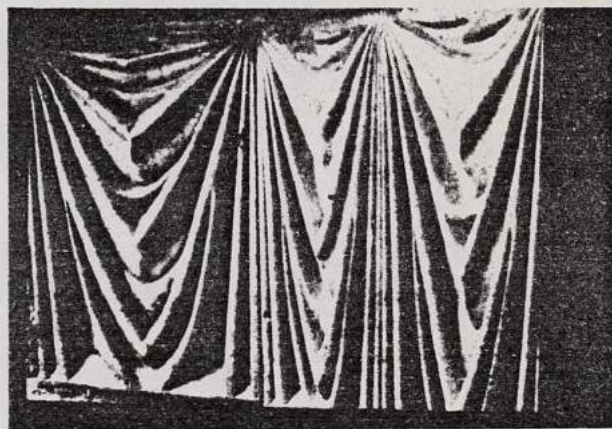
Aujourd'hui, une multitude de produits, de bâtiments, de véhicules, d'objets, sont régis par les règles et techniques du pliage.



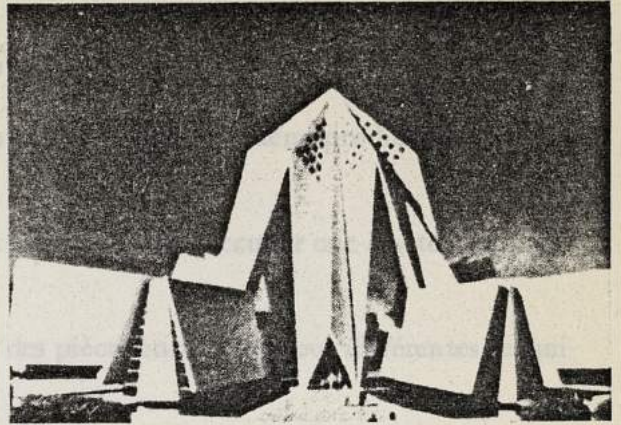
13e s. — Tour tombeau (Iran).



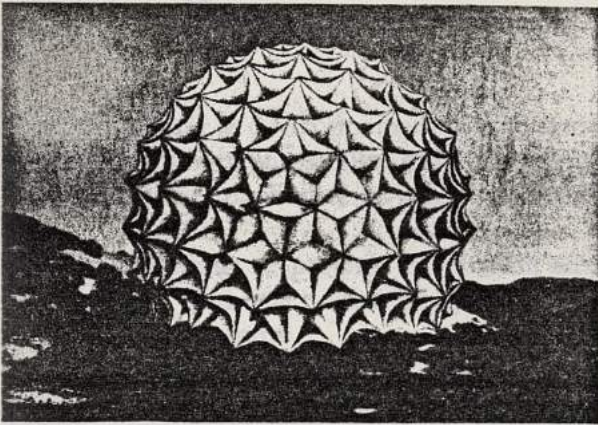
Mur courbe. Summer Spaulding.



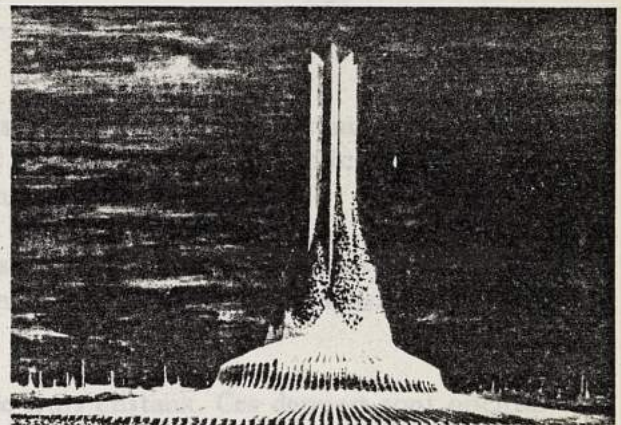
Drapé sculpté dans la pierre. Cathédrale de Reims.
France.



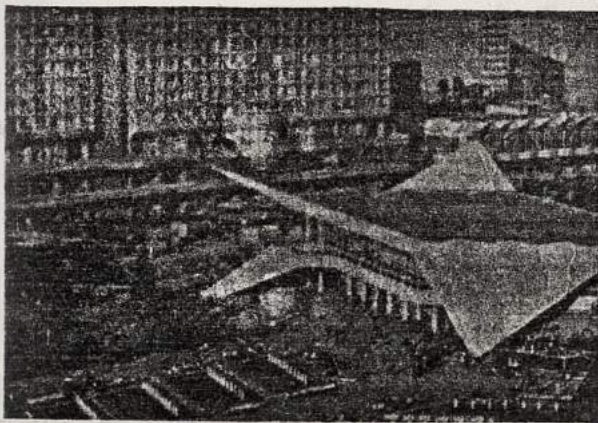
Projet « Temple of understanding ». Wasing ton, D.C.
Lathrop Douglas.



1957 — Projet d'un dôme constitué d'éléments. P.H.,
Allemagne. Günter Günshal.



1919 — Projet de construction. Wassili Luckart.

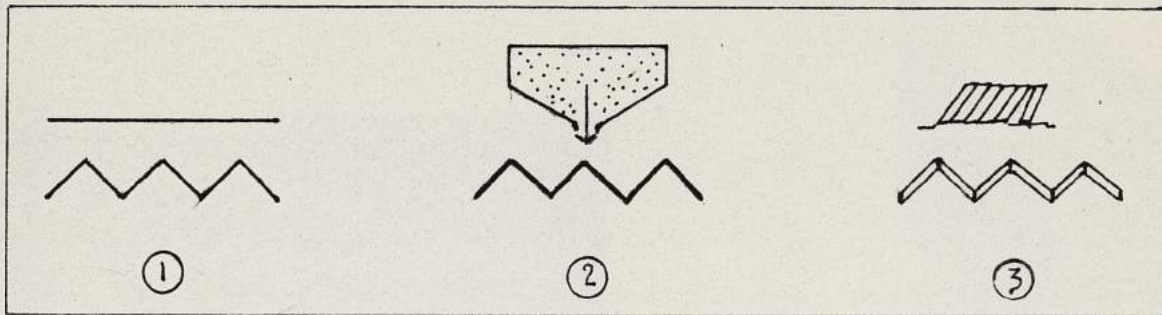


1983 — Tour de la radio-télévision. Berlin, R.D.A.



Nous considérons trois processus distincts de mise en plis des matériaux.

- Premièrement, le formage, qui consiste à plier ou à cintrer par la force un demi-produit tel qu'une feuille, un tube ou une barre.
- Deuxièmement, le moulage, où le matériau en son état plastique vient occuper une cavité et se solidifie.
- Troisièmement, l'assemblage, qui consiste à solidariser des pièces entre elles pour différentes techniques.



Il est à souligner le développement d'un quatrième processus, qui consiste à programmer la structure même du matériau (possibilité d'inscrire les ondulations de la tôle lors de la fabrication de cette dernière) qui a la possibilité de réagir suivant le milieu ambiant.

Tous les matériaux se prêtent, en général, aux processus de moulage et d'assemblage. Par contre, il n'en est pas de même pour le pliage où une grande quantité de matériaux sont impossibles à plier, tels le béton et la fonte.

Lors du pliage, les métaux subissent une déformation de leurs cristaux. Ces derniers sont orientés dans le sens de la déformation (écrouissage). Les fibres des papiers se courbent sous l'effort (lorsque le pliage est effectué dans le sens contraire du sens machine). Les plastiques (polymères) subissent des variations sous le thermoformage plus ou moins fortes avec une disparition momentanée des « cristallites ».

Le pliage peut donc être défini comme étant une intervention qui perturbe l'ordre primaire de la structure du matériau. Pour cette raison, on se doit de considérer le cintrage ou cambrage (grand rayon de courbure) comme faisant partie du pliage.

La structure (plasticité), la propriété de résilience et la section (épaisseur, diamètre) vont déterminer les limites du pliage. Rappelons ici que le pliage est une déformation plastique permanente qu'il ne faut pas confondre avec les déformations élastiques qui disparaissent avec l'arrêt de l'effort exercé.

Les matériaux subissent deux types de travail lorsqu'ils sont pliés :

- premièrement, un étirement (tension) dans la partie convexe extérieure;
- deuxièmement, un refoulement (compression) dans la partie intérieure concave.

La surface de partage entre ces deux zones est appelée fibre neutre (conserve sa longueur initiale).

L'épaisseur des matériaux pliés varie de dimensions infimes (quelques microns pour les feuilles d'aluminium utilisées dans les parois à âme alvéolaire des avions) à des dimensions limitées par les machines, le rayon de courbure et ses limites d'étirabilité (10 cm pour les plastiques, 5 cm pour les métaux).

BETONS



1973 - Projet étudiant - Arena - de 2 000 places
University of Pennsylvania, Levy, Mark
& Price



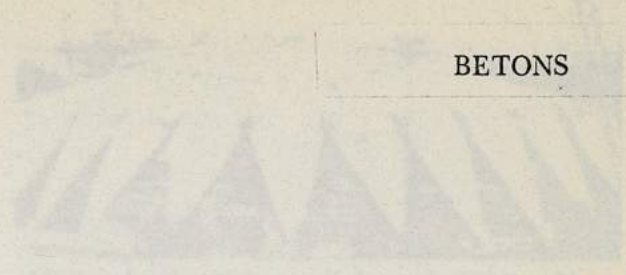
1978 - Academy of arts - Memphis, Tennessee
U.S.A.



1978 - Eglise San Carlo, Monte-Rossi, L'Espresso



1980 - Signal, Cuernavaca, Mexique, Caride



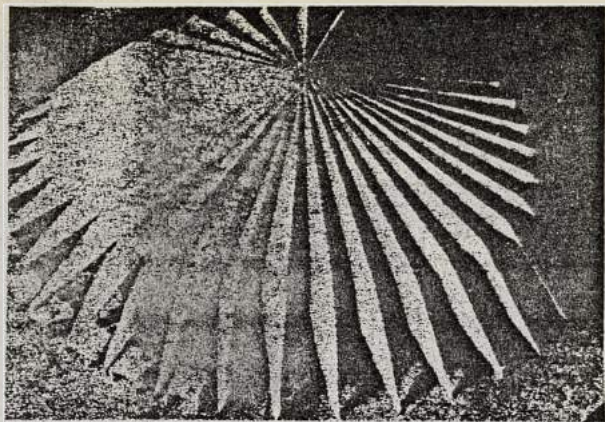
1980 - Installation of art - John Gimpel, 1980
The U.S. State Department, Washington



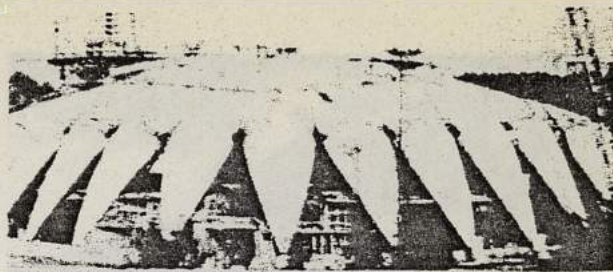
1980 - Centre de construction de ville, Mexico
A. G. G. - Avenida H. H. - Illbruck, U.S.A.
Harrison & Collins



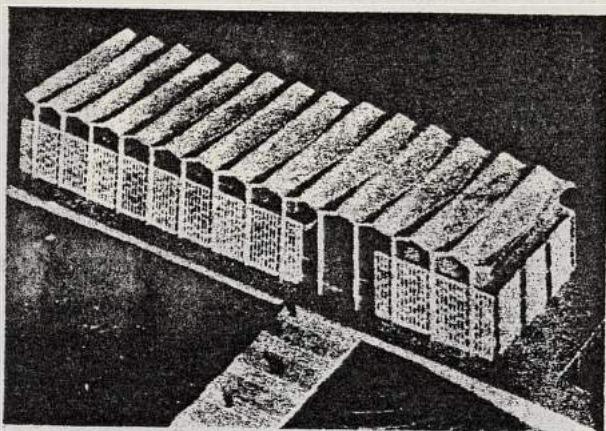
Clavier de construction - in situ - de la
tour de beton précontraint, Paris, France
De Greybues



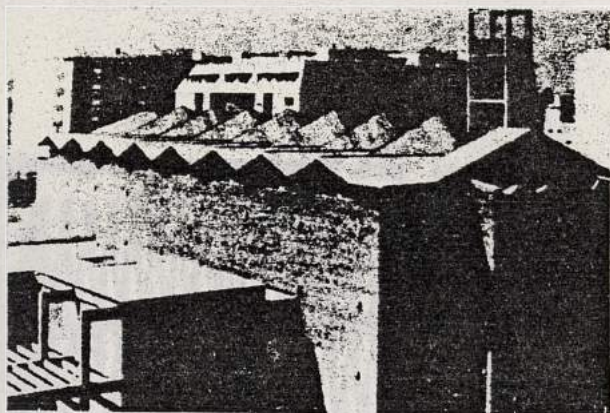
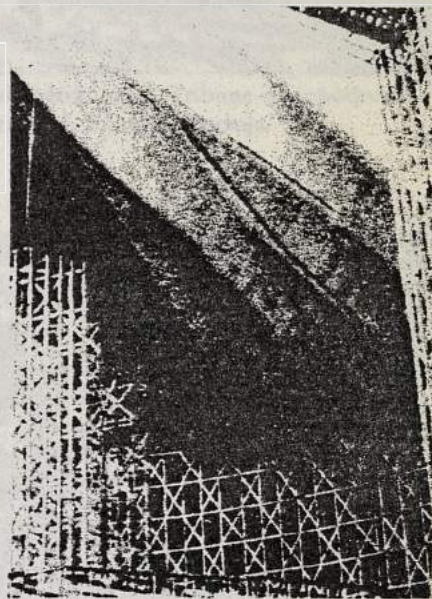
1953 — Projet étudiant « Arena » de 8 000 places.
University of Pennsylvania. Levy, Mark
& Price.



1980 — Equipement sportif. Jeux olympiques. Mos-
cou, U.R.S.S. Shikowski & Kollertiv.



1959 — « Academy of arts ». Memphis, Tennessee,
U.S.A.



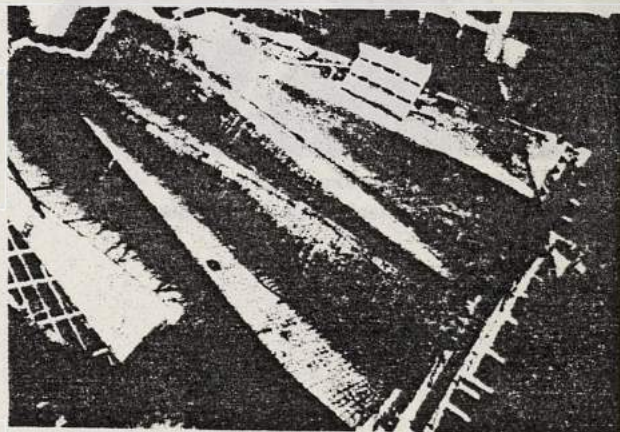
1959 — Eglise San Luca. Rome, Italie. Passarelli.



1960 — Chantier de construction en voile mince
« in situ ». « Assembly Hall ». Illinois, U.S.A.
Harrison et Abramovitz.



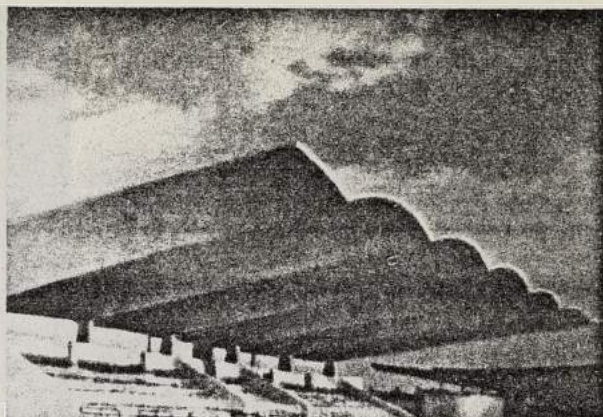
Abri signal. Cuernavaca, Mexique. Candela.



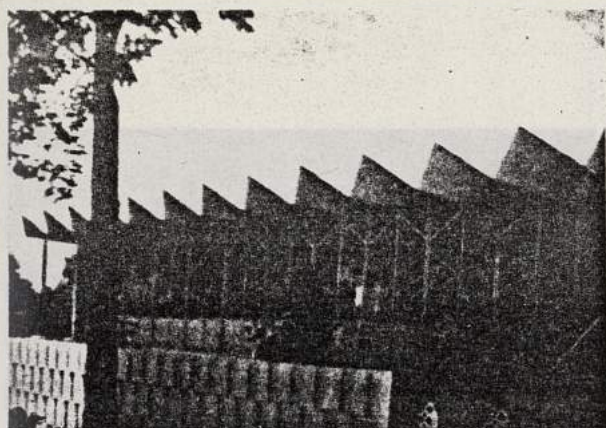
Chantier de construction « in situ » d'une
toiture en béton précontraint. Paris, France.
De Freyssinet.



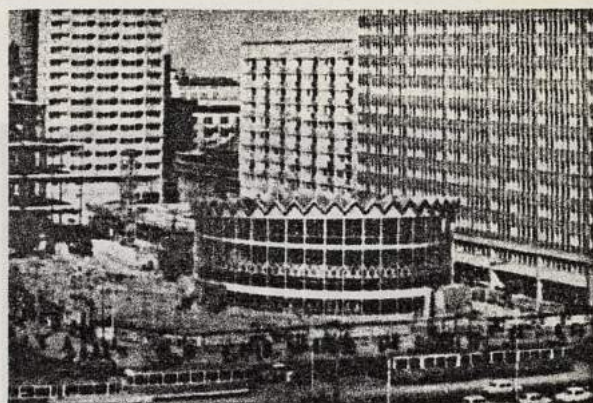
1943 — Construction d'abris militaire à l'aide de béton et de toile de jute. Major J.H. de Waller.



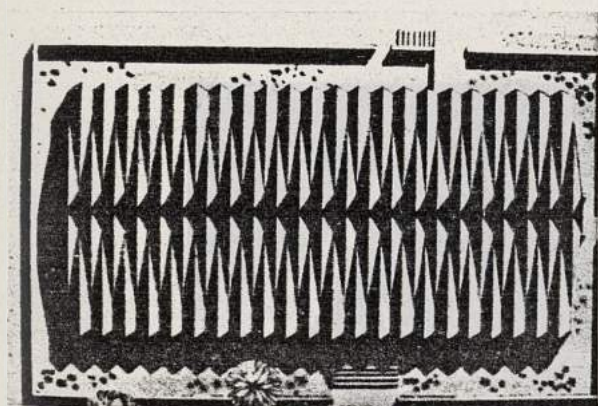
1953 — Voile de béton armé. Tribune d'hippodrome (la Zarzuela). Eduardo Torroja.



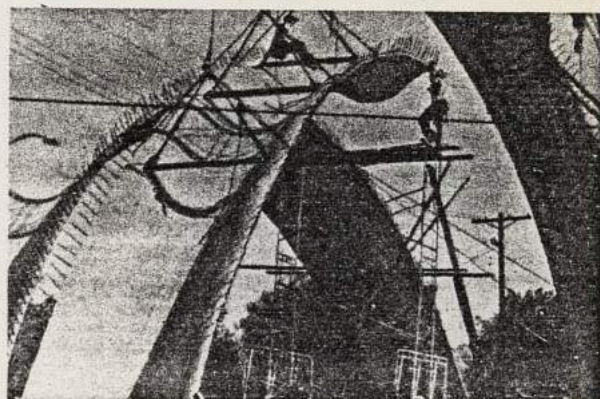
1959 — American concrete institute. Detroit, Michigan, U.S.A. M. Yamasaki & associated.



1965 — Caisse d'épargne. Varsovie, Pologne. Karpinski



1959 — Plan masse de l'« American concrete institut ». Detroit, Michigan, U.S.A. M.



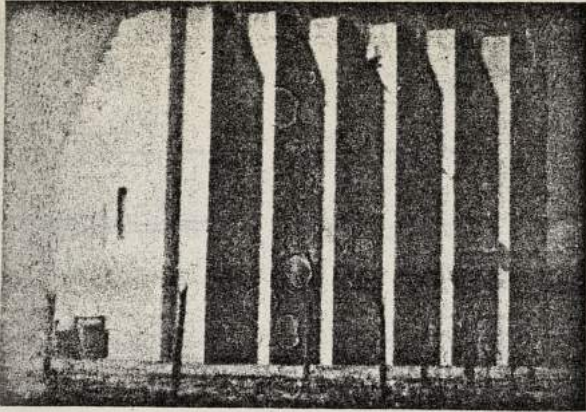
1960 — Montage de coques minces. Patinoire, Californie, U.S.A. Carl Maston & Bradshaw.



1954 — Église Santa Maria Miraculosa, Mexique. Candela & Lopez



1957 — Laboratoire de l'Université de Mexico (voile en béton de 15 mm d'épaisseur). Candela & Lopez

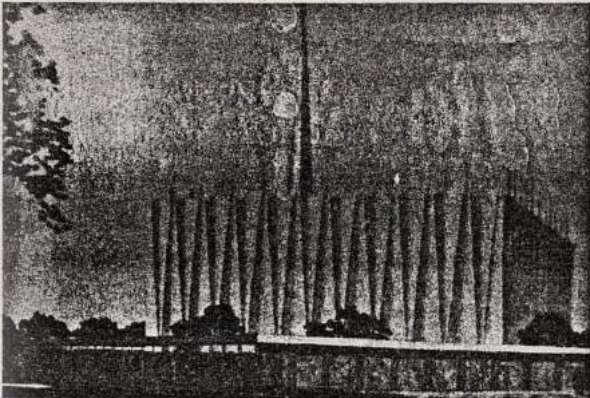


Béton d'argile expansé. Usine pharmaceutique.
Avignon (France). G. & A. Cazes.

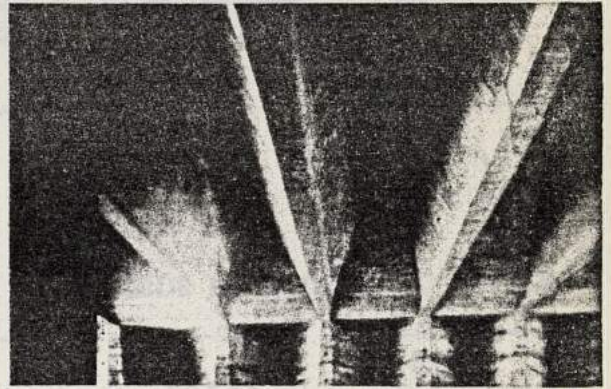


1961 — Monastère bénédictin. Colledgeville, Minnesota.
Marcel Breuer.

PROCÉDES DE FORMAGE DES TERRRES



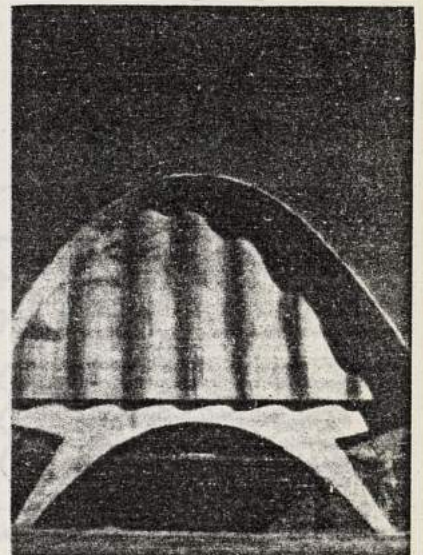
1959 — Chapelle. « Adolphus College ». St Peter,
Minnesota, U.S.A. Magney, Setter, Leach
& Lindstrom.



1958 — Palais de l'Unesco. Paris, France. Pier Luigi
Nervi.

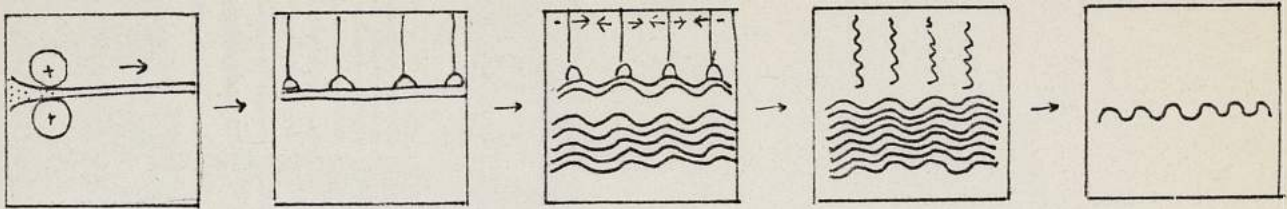


1954 — Eglise Santa Maria Miraculosa.
Mexique. Candela & Lamora.

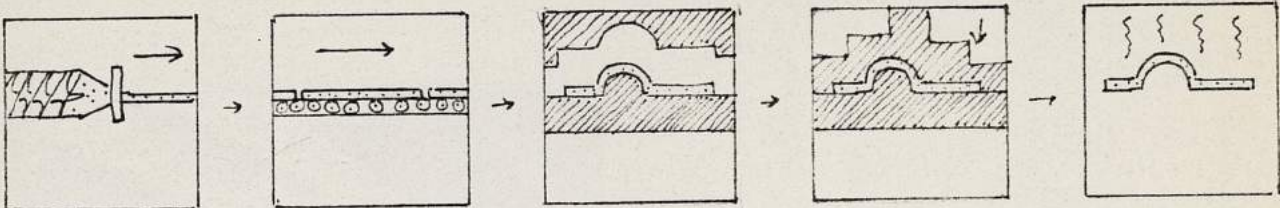


1952 — Laboratoire de l'Université
de Mexico (voile en béton de 16 mm
d'épaisseur). Candela & Reyna.

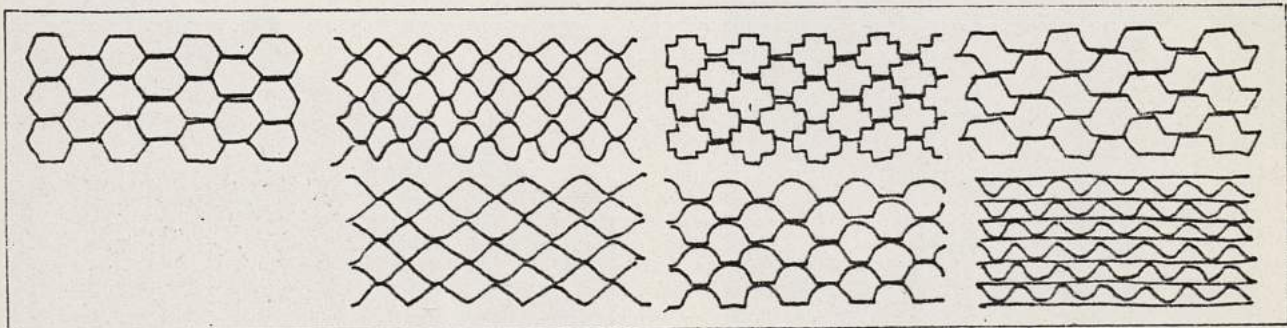
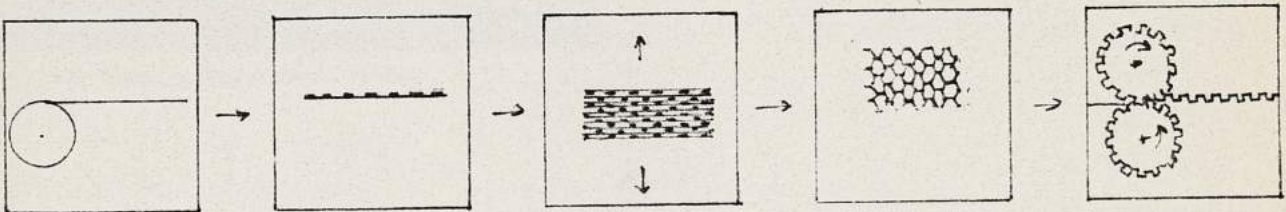
PROCÉDÉ DE FORMAGE DES PLAQUES DE FIBRO-CIMENT



PROCÉDÉS DE FORMAGE DES TERRES



PROCÉDÉ DE PLIAGE DU PAPIER



Différentes configurations d'âmes alvéolaires (nid d'abeille).



Pavillon de l'élégance. Exposition universelle de Paris. Fibro-ciment ondulé. Allard & Kohmann.



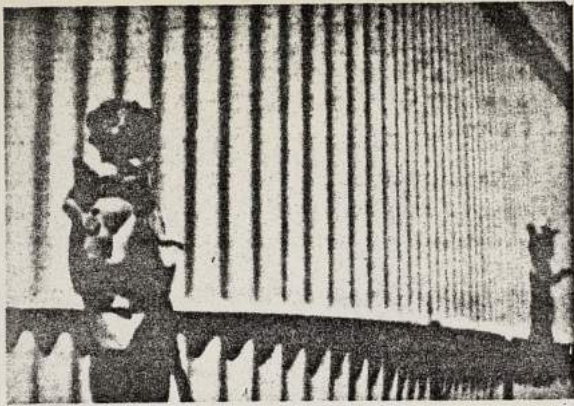
Plaque ondulée fibro-ciment. France.



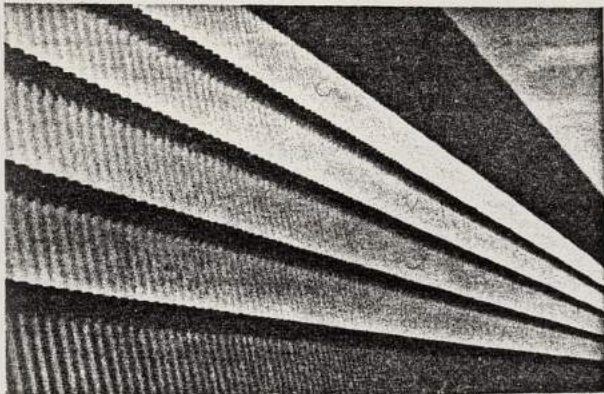
Plaque de fibro-ciment placée à amplitude variable. Charente-Maritime, Bay, France.



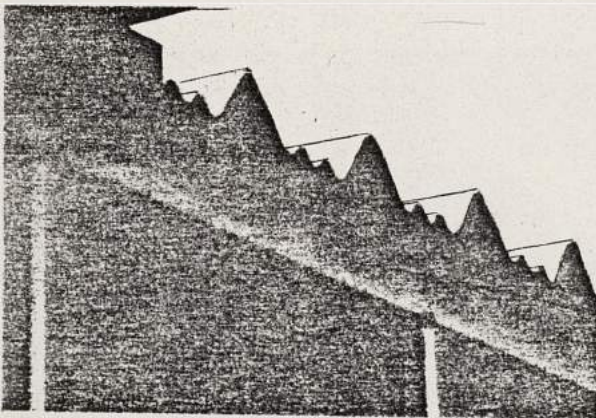
Emploi du fibro-ciment en mur et toiture.



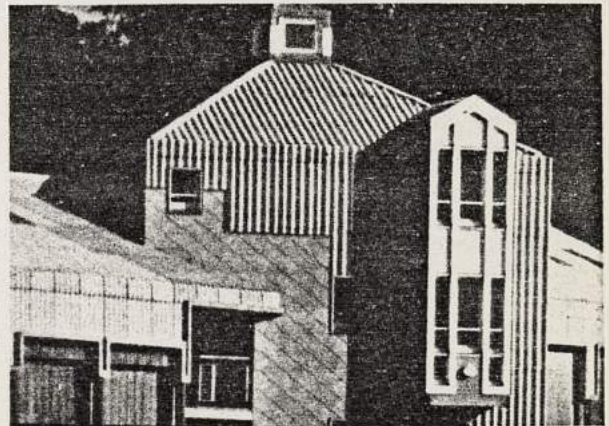
1937 — Pavillon de l'élégance. Exposition universelle de Paris. Fibro-ciment ondulé. Aillaud & Kohlmann.



Plaques ondulées fibro-ciment. France.



Plaques de fibro-ciment plissées à amplitude variable. Commerce, Ivry, France.



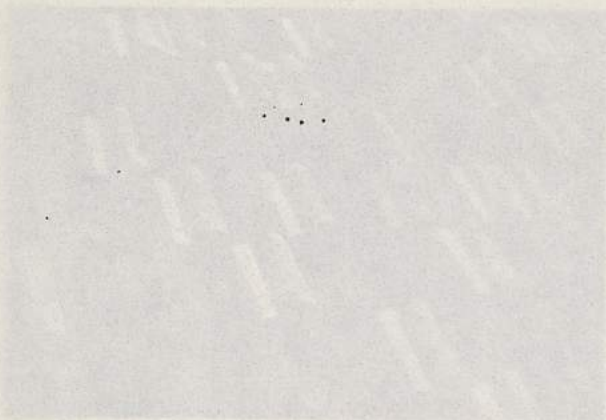
Emploi du fibro-ciment en mur et toiture.



1939 — Textile imprégné de
asbeste « porcelaine »



Mise en forme de plaque d'argile à l'aide
d'un moule en pierre.



1940 — Romaines.



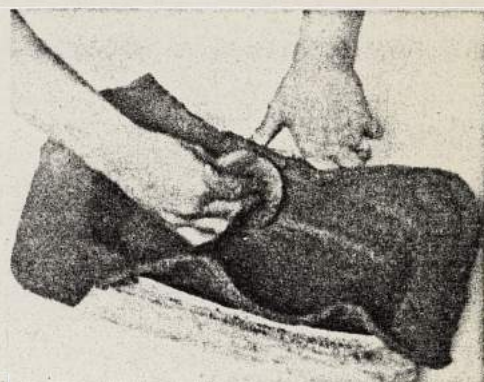
1941 — Terre cuite « Barmine » japonaise.



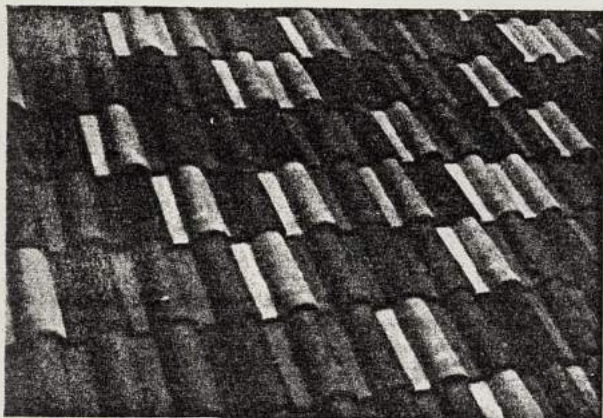
1944 — Construction d'une usine à l'aide de briques
céramiques, Jacques Cousteau (France).



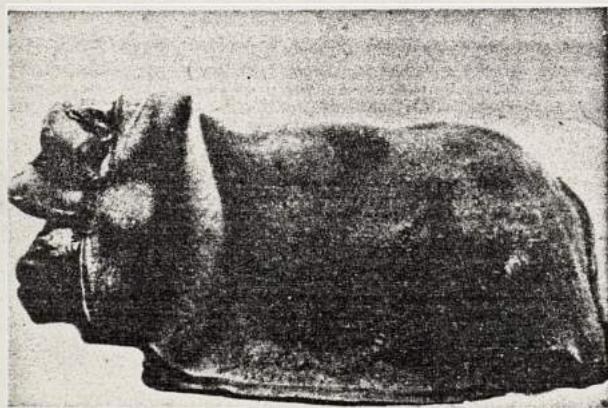
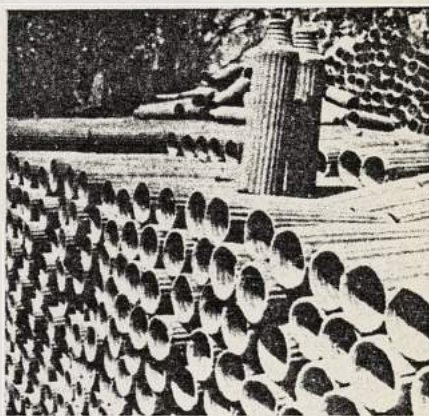
Sculpture. Textile imprégné de barbotine porcelaine.



Mise en forme de plaque d'argile à l'aide d'un moule en plâtre.



Tuiles romaines.



1980 — Terre cuite. « Dormeur ». Jeanclos.



1944 — Construction d'une voûte à l'aide de fusées céramiques. Jacques Couelle (France).

1675 : Invention de la « pâte hollandaise » : Remplacement des moulins et des marteaux par des cylindres rotatifs munis de lames d'acier. Ces pâtes sont encore en fonction de nos jours.

1781 : Premier ouvrage théorique « L'art de faire du papier » (pp. 11). DeLalande.

1799 : Nicolas Louis Robert invente la machine qui fabrique du papier en continu (laquelle sous ce type de machine produit 37 km de papier à l'heure).

1719 : Réaumur est l'idée d'employer la fibre de bois : « Les fibres des goudriers sont constituées de carton composé de bûchettes de bois auxquelles on a mis des copeaux dans le bois et la goudre ».

1760 : Premières pâtes mécaniques de bois produites d'après les principes de Réaumur.

Carton ondulé : Brevet anglais 1857.

1^{ère} usine de carton ondulé 1858 (en France).

1^{er} sac de papier toilette : Brevet américain 1871.

1^{er} papier à l'office tout carton par U.S. War Production 1944.

PAPIERS – HISTORIQUE

Hollande 1750 : Invention de la « pile hollandaise ». Remplacement des maillets et des auges par des cylindres rotatifs munis de lames d'acier. Ces piles sont encore en fonction de nos jours.

France 1761 : Premier ouvrage théorique « L'art de faire du papier », par J.J. Delelande.

France 1799 : Nicolas Louis Robert invente la machine qui fabrique du papier en continu (actuellement ce type de machine produit 37 km de papier à l'heure).

France 1719. Réaumur eut l'idée d'employer la fibre de bois : « Les parois des guêpiers sont constituées de carton composé de buchettes de bois extrêmement fines, découpées dans le bois par la guêpe. »

1860 : Premières pâtes mécaniques de bois produites d'après les principes de Réaumur.

Carton ondulé. Brevet anglais 1857.

Première usine de carton ondulé 1888 (en France).

Rouleaux de papier toilette : Brevet américain 1871.

Premier édifice tout carton par U.S. War Production 1944.



1942 - Structure plâtrée. Travaux d'étudiants. G. Bartsch. Ecole d'architecture de Weimar (R.D.A.).



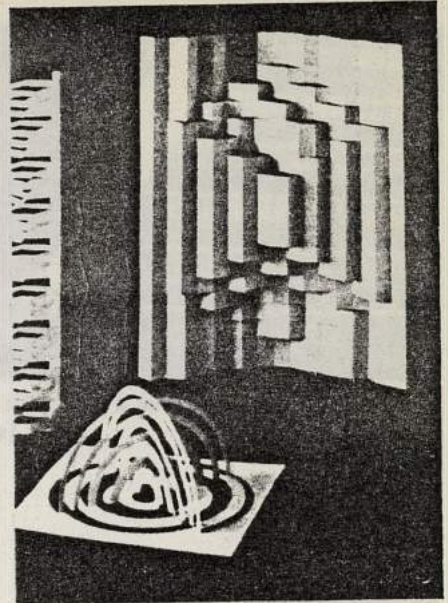
1970 - Travaux d'étudiants. Ecole spéciale d'architecture, Paris, France.



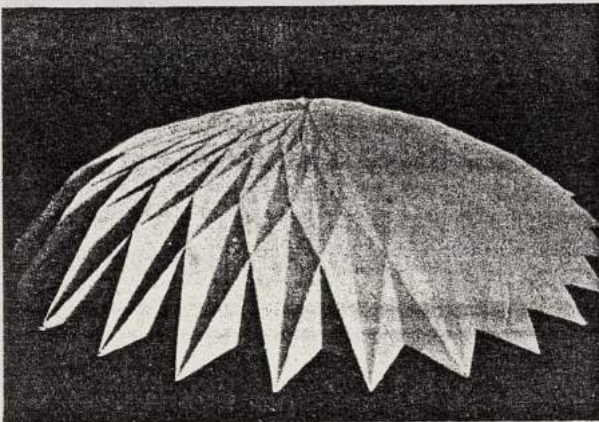
Application graphique du pliage d'une feuille de papier.



Autoportrait du maître Akira Yoshima.
Japon.



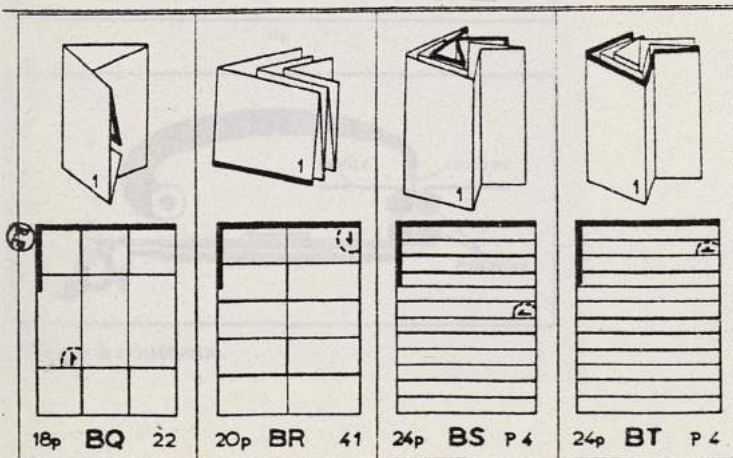
1982 — Travaux d'étudiants.
Ecole du Bauhaus.
Dessau, Allemagne. J. Albers.



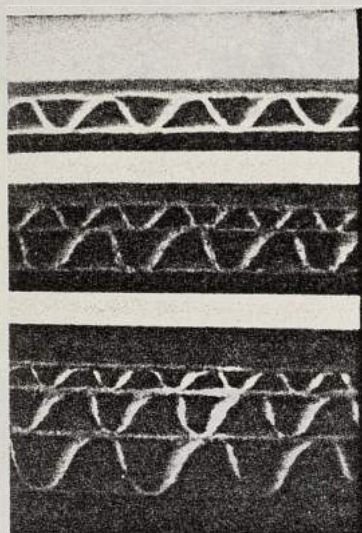
1982 — Structure plissée. Travaux d'étudiants. O. Butner.
Ecole d'architecture de Weimar (R.D.A.).



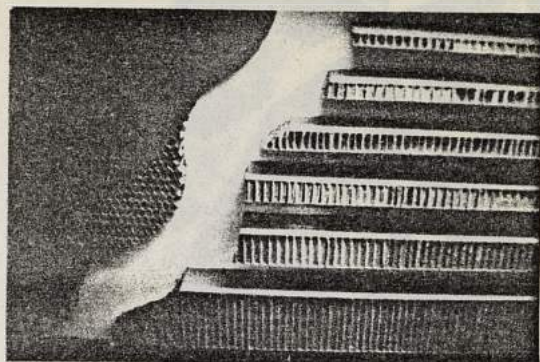
1970 — Travaux d'étudiants. Ecole spéciale d'architecture. Paris, France.



Représentation graphique du pliage d'une feuille de papier.



Différents types de cartons ondulés à simple, double et triple cannelure.



Plaques de carton à âme alvéolaire (nid d'abeille).



Plaques ondulées cellulo-minérales imprégnées. Catégorie des cartons spéciaux : « onduline ».

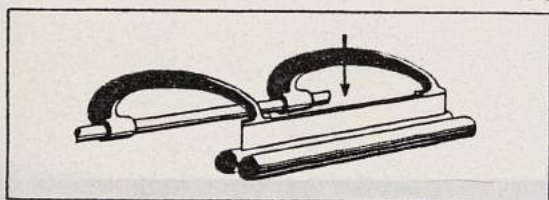
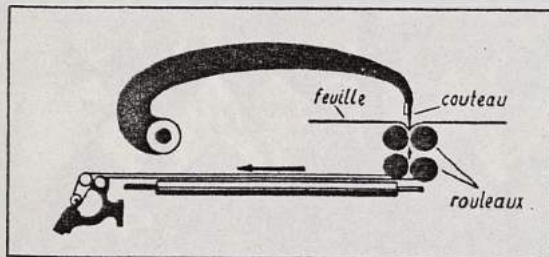
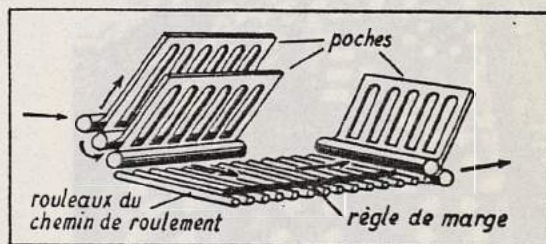


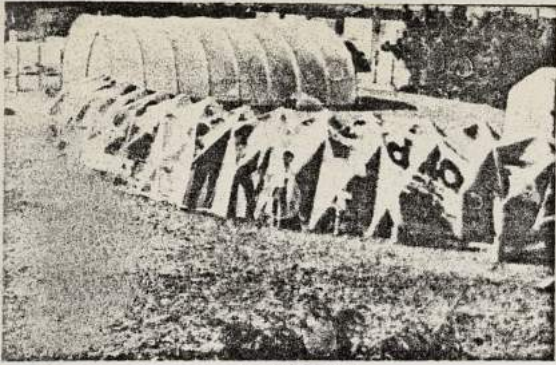
Fig. 1



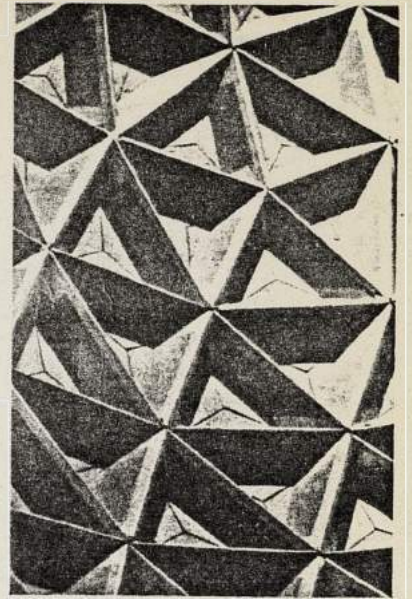
Plieuse à couteaux.



Plieuse à poches.

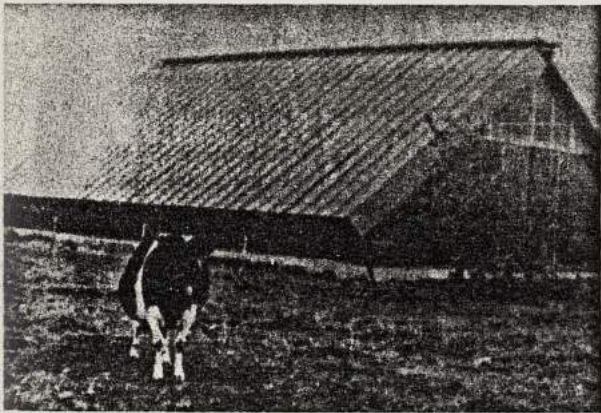


1971 — « Polyfalt » Ika 71. Allemagne.

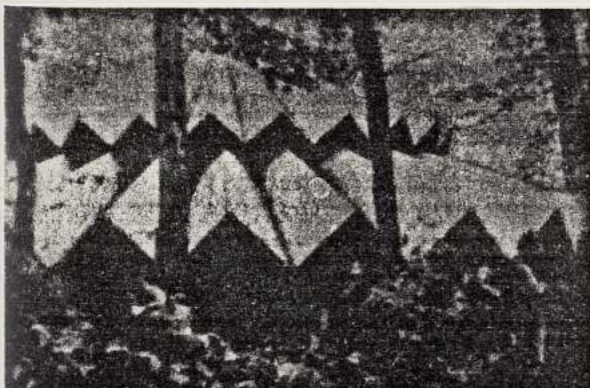


1954 — Intrados d'un dôme.

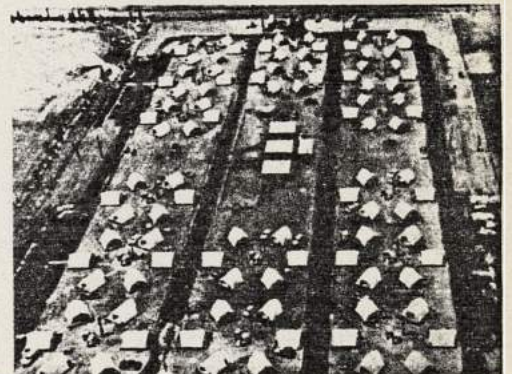
B. Fuller, U.S.A.



1975 — Grange. Caissons en carton ondulé. Wageningen, Hollande. Bureau Beauchez.



1974 — Yurt mongolien. Bucks Harbour, Maine, U.S.A. Dr Ws. Copperthwaite.



1966 — Constructions repliable utilisées en Californie. Hirshen & Vander Ryn (U.S.A.).

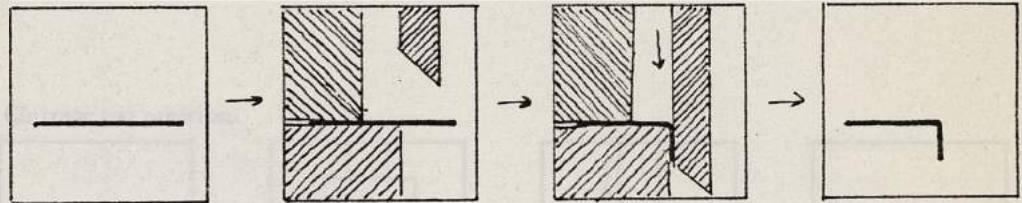
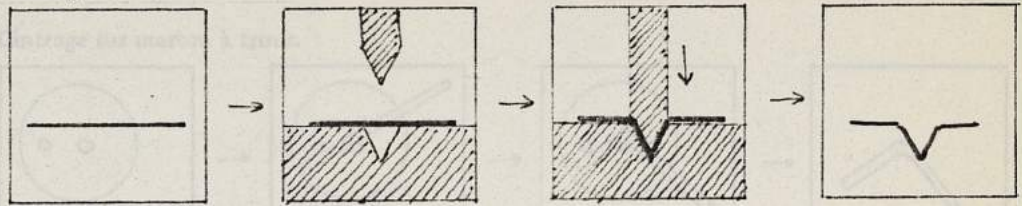
- 1854 - Début de l'utilisation des tôles de fer blanches en tôle ondulée.
- 1857 - Production de tôles laminées.
- 1858 - Utilisation de la tôle ondulée dans la construction des entrepôts « London Dock ».
- 1859 - Publication de « Encyclopædia of cottage, farm and villa architecture ». Préconise l'emploi de la tôle ondulée pour les entrepôts, hangars, usines.
- 1861 - Mise au point du procédé de galvanisation des tôles par Bessemer (France).
- 1862 - Première production de tôle ondulée galvanisée.
- 1863 - Invention par J.H. Porter de l'emploi de tôles plissées en arcs entre poutres comme coffrage perdu pour béton (plancher) dans la construction de la raffinerie de William Fairbank (Angleterre).
- 1864 - Brevet de la tôle ondulée (Grand-Bretagne).
- 1865 - Brevet d'une machine à nervurer les tôles galvanisées par Pierre Cazenove (France, présentation à l'Exposition universelle de 1865).
- 1866 - Publication du catalogue Lefferts, illustre les emplois possibles de la tôle ondulée galvanisée (U.S.A.).
- 1867 - Peter Naylor, industriel, fabrique des maisons portables en tôle ondulée galvanisée expédiées en Californie pour les chercheurs d'or.
- 1868 - Brevet J. Gibert concernant l'emploi des tôles ondulées pour coffrage des planchers en béton.
- 1870 - Publication du « Catalog of the Philadelphia architectural iron company », Système de construction de planchers à l'aide d'arcs en tôles ondulées et remplissage en béton.
- 1872 - Construction des « HBM » de Drancy (France), à l'aide d'ossatures en tôle plissée.

1700. – Début de l'utilisation des tôles de fer blanc en toiture.
1800. – Production de tôles laminées.
1828. – Utilisation de la tôle ondulée dans la construction des entrepôts « London Dock ».
- 1833 – Publication de « Encyclopedia of cottage, farm and villa architecture ». Préconise l'emploi de la tôle ondulée pour les entrepôts, hangars, usines.
1837. – Mise au point du procédé de galvanisation des tôles par Sorel (France).
- 1840 – Première production de tôle ondulée galvanisée.
- 1845/50 – Invention par J.H. Porter de l'emploi de tôles plissées en arcs entre poutres comme coffrage perdu pour béton (plancher) dans la construction de la raffinerie de William Fairbam (Angleterre).
1850. – Brevet de la tôle ondulée (Grande-Bretagne).
1851. – Brevet d'une machine à nervurer les tôles galvanisées par Pierre Carpentier (France, présentation à l'Exposition universelle de 1855).
- 1852 – Publication du catalogue Lefferts. Illustre les emplois possibles de la tôle ondulée galvanisée (U.S.A.).
- 1854 – Peter Naylor, industriel, fabrique des maisons portables en tôle ondulée galvanisée expédiées en Californie pour les chercheurs d'or.
- 1867 – Brevet J. Gilbert concernant l'emploi des tôles ondulées pour coffrage des planchers en béton.
- 1872 – Publication du « Catalog of the Philadelphia architectural iron company ». Système de construction de planchers à l'aide d'arches en tôles ondulées et remplissage en béton.
1935. – Construction des « HBM » de Drancy (France), à l'aide d'ossatures en tôle pliée.

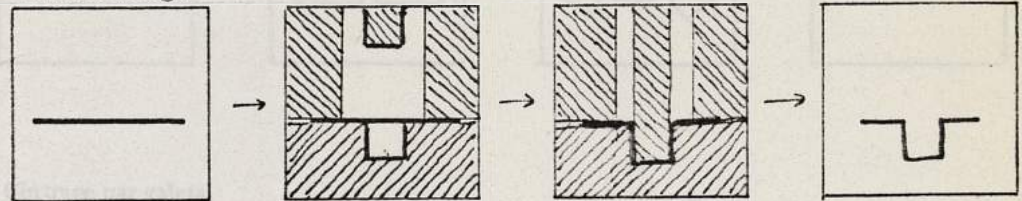
7. – Galvaage.



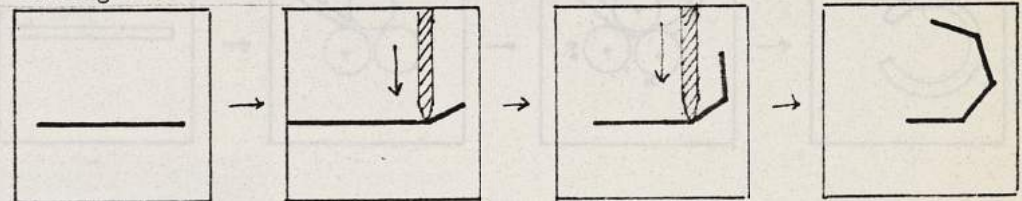
1. - Pliage.



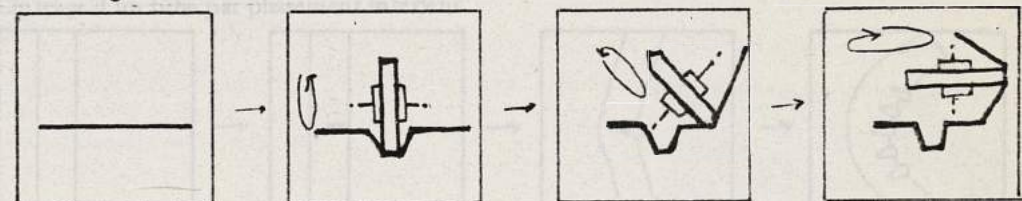
2. - Emboutissage.



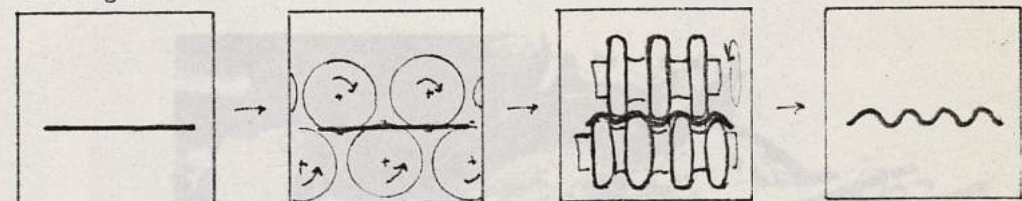
5. - Cintrage.



6. - Profilage.

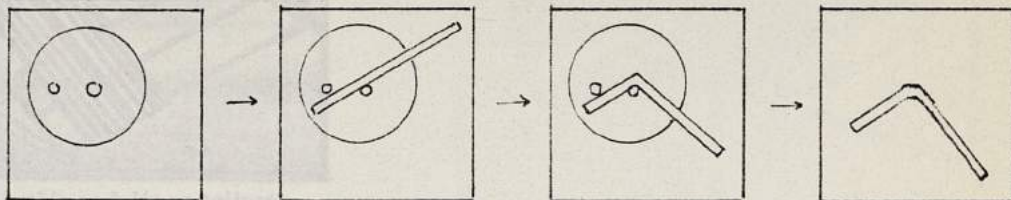


7. - Galetage.

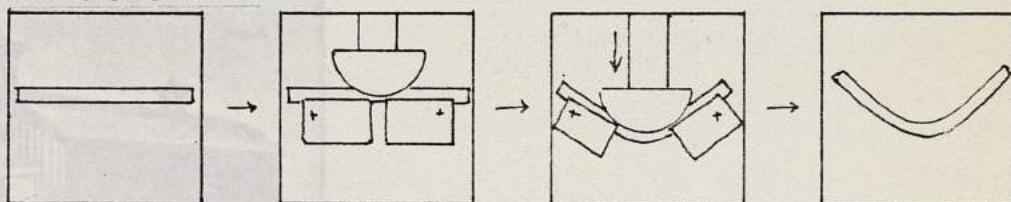


PROCÉDÉS DE CINTRAGE DE TUBES ET DE BARRES

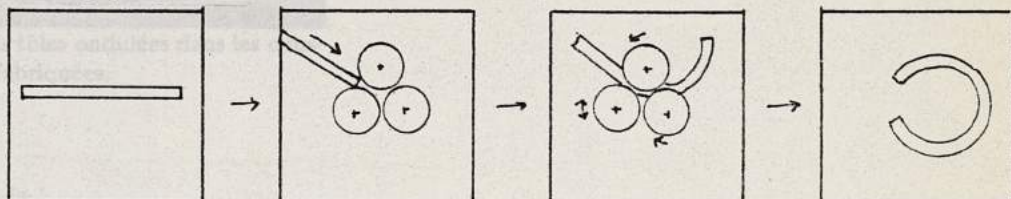
Cintrage sur marbre à trous.



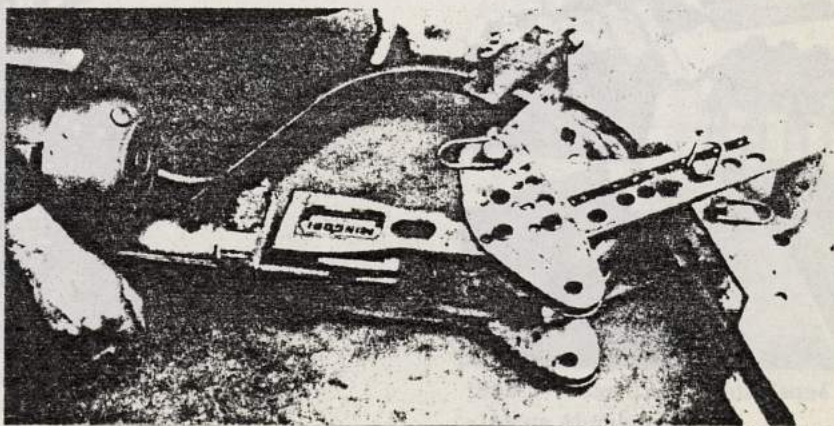
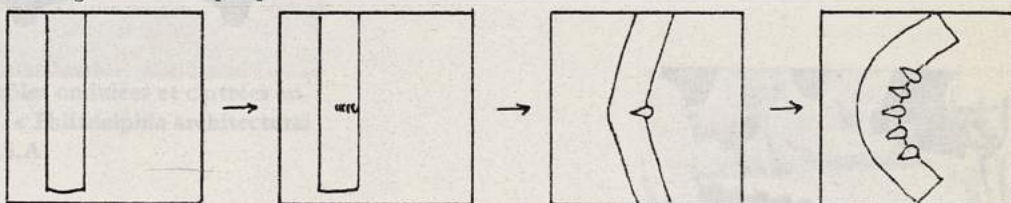
Cintrage par pression.



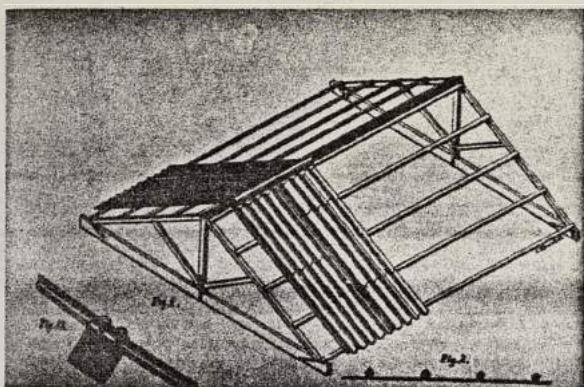
Cintrage par galets.



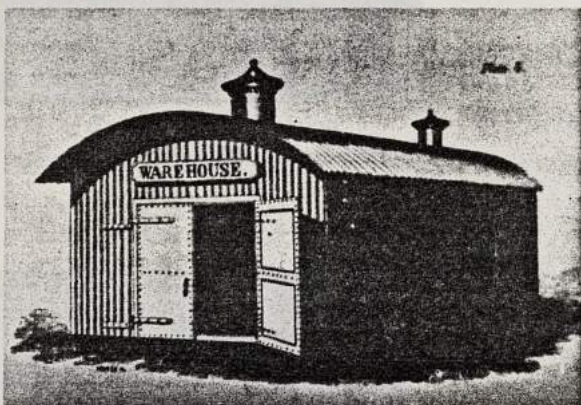
Cintrage d'un tube par plissement intérieur.



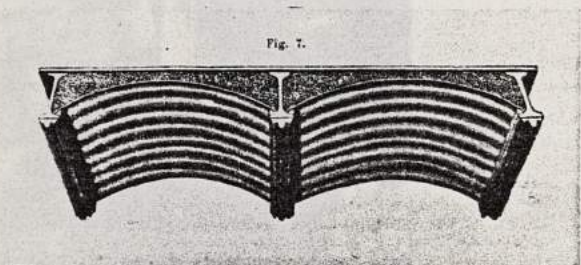
Cintreuse à vérin oscillant « Mingori ». Autorise le cintrage de tubes ronds, carrés et rectangulaires.



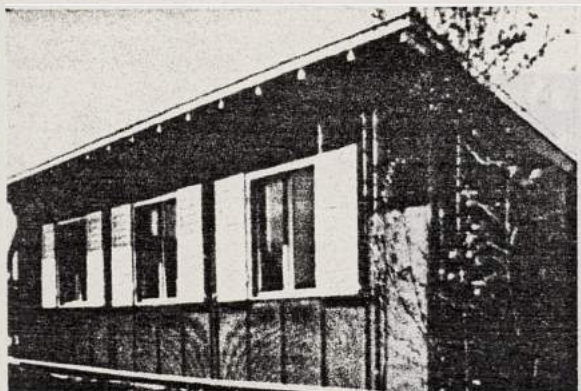
1854 — Utilisation de la tôle ondulée en toiture.
U.S.A.



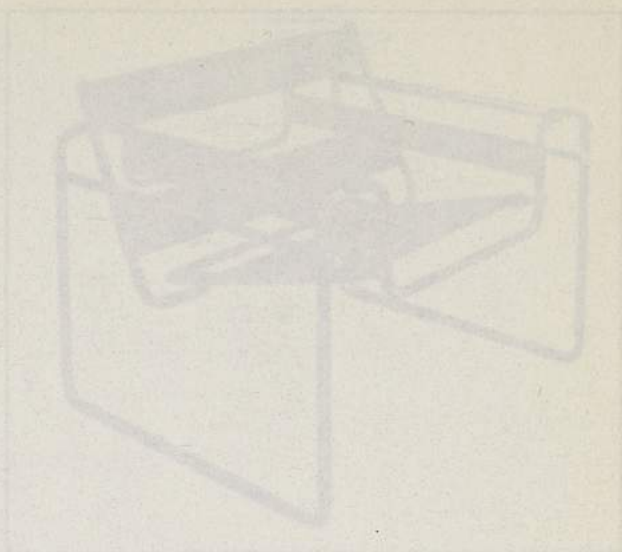
1854 — Utilisation des tôles ondulées dans les constructions préfabriquées.



1872 — Utilisation des tôles ondulées et cintrées en coffrage perdu. « Philadelphia architectural company », U.S.A.



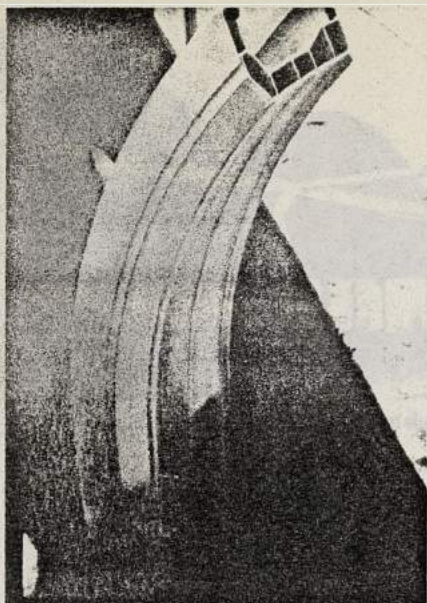
1931 — Tôles de cuivre ondulé, composant préfabriqué. Allemagne. Walter Gropius.



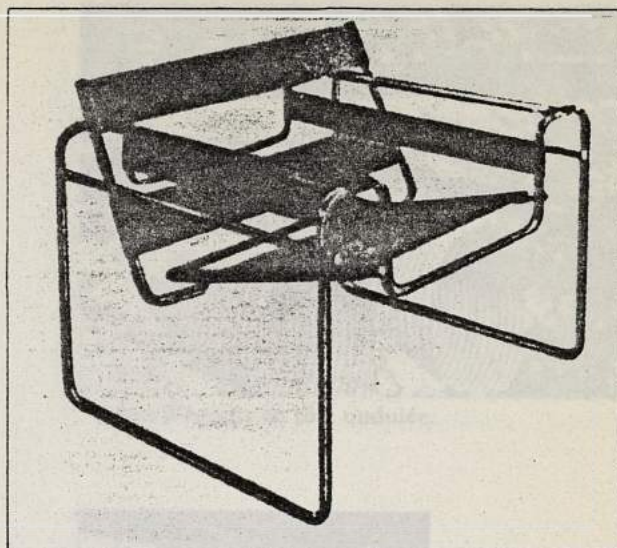
1975 — La nouvelle toiture en tôles ondulées Alcoa Aluminium.



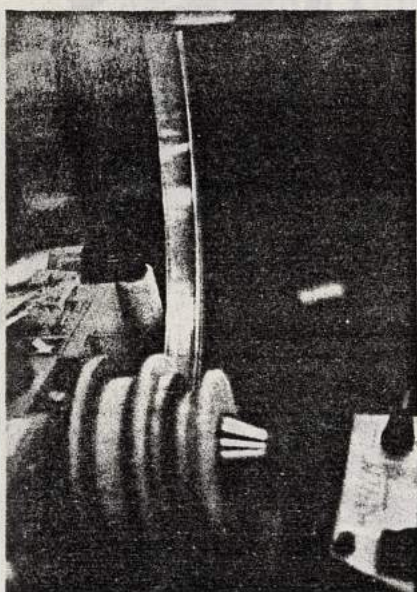
1959 — Tôles d'aluminium laqué
« Alcoa Aluminium »



Profilé d'aluminium de section importante (30 x 30). Cintré à froid.

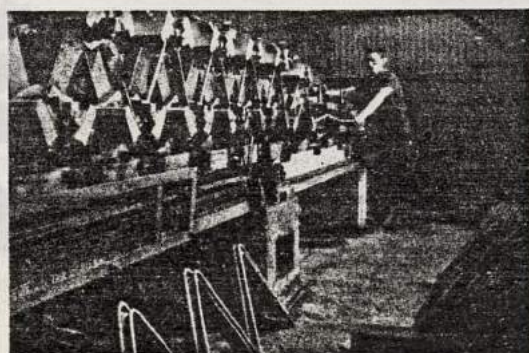


1925 — La première chaise en tube cintré. Marcel Breuer.

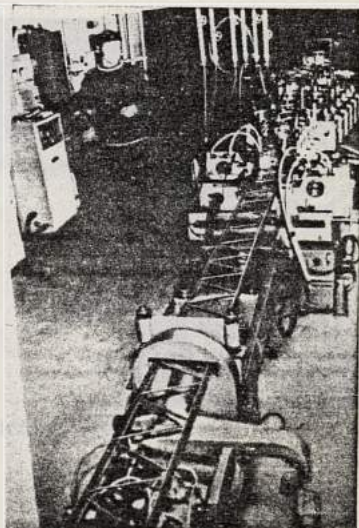


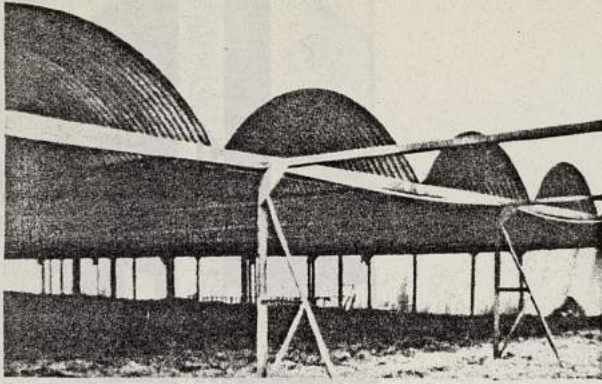
Cintreuse automatique de profils d'aluminium.

Machine à rouleaux pour le formage des tôles ondulées.

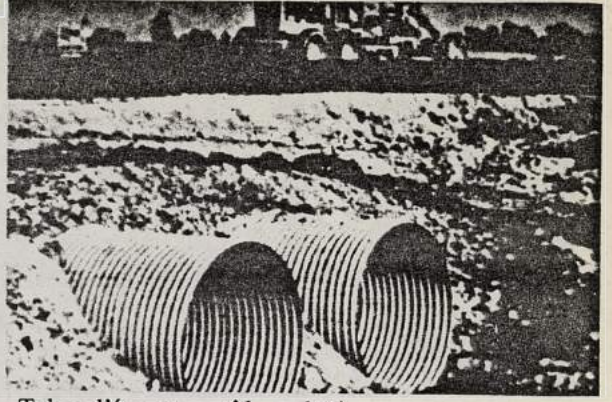


Cintrage de barres destinées à la fabrication de poutrelles légères.

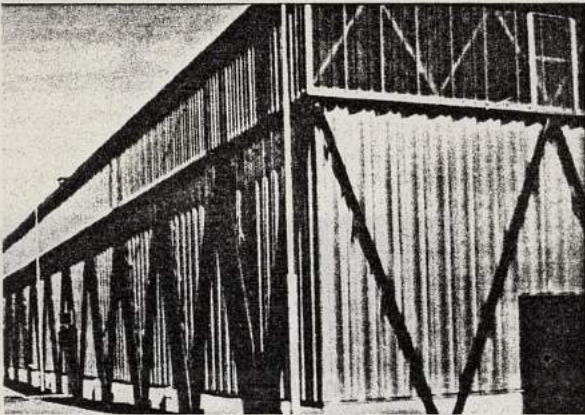




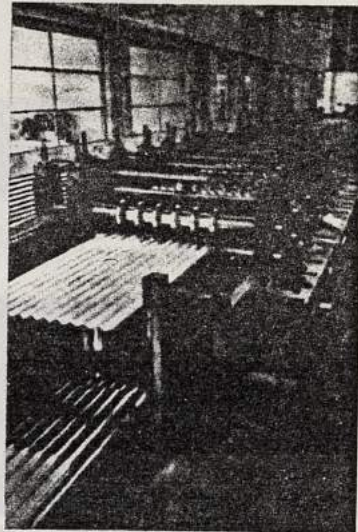
Endiverie. Antrain, France. Tôle ondulée cintrée.



Tubes d'égouts en tôle ondulée.



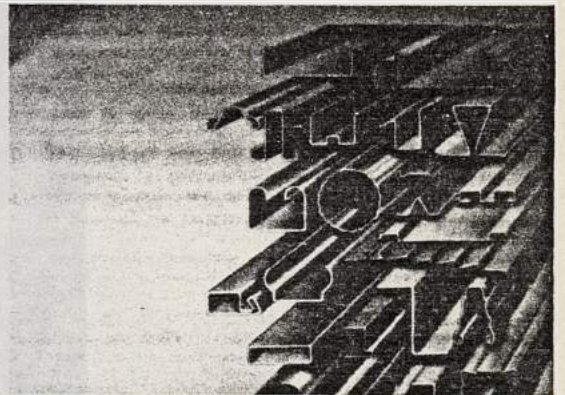
Bardage en tôle d'acier galvanisé nervuré.



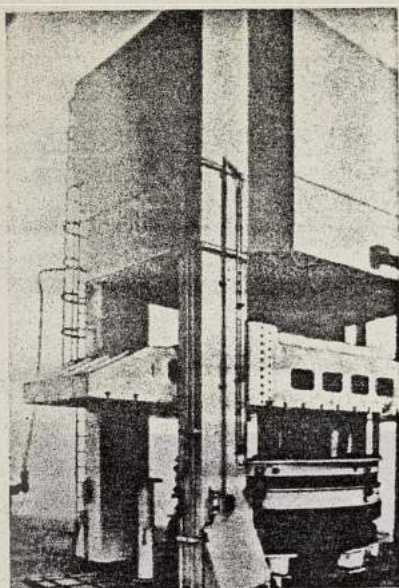
Machine à galets pour le formage des tôles ondulées.



Profils divers de tôle galvanisé.



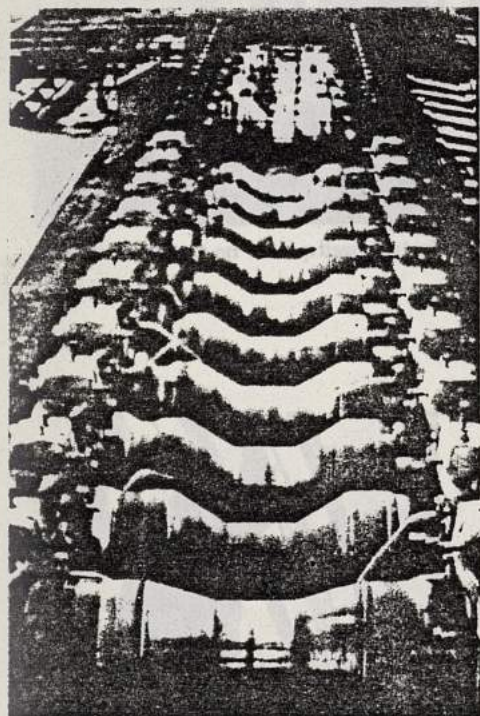
1980 — Variété de tôles plissées.



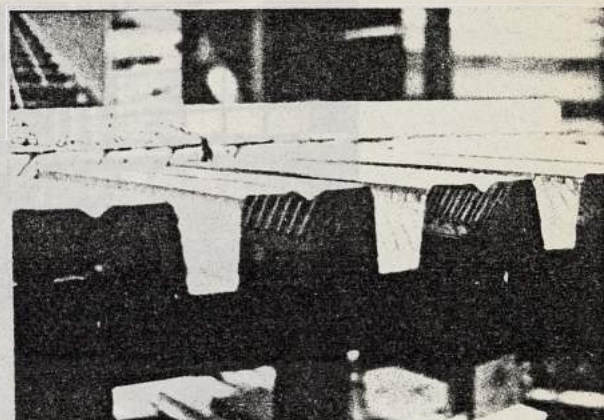
Presse à emboutir de 600 tonnes.



1985 — Tôles d'acier embouties destinées aux toitures.
France.



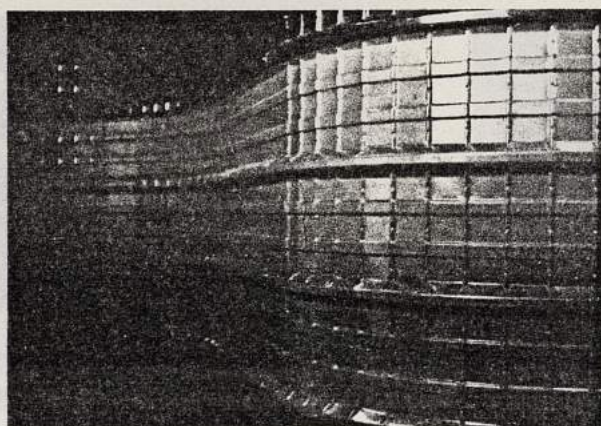
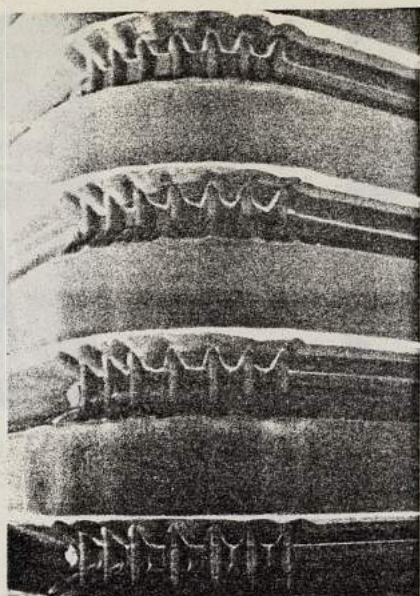
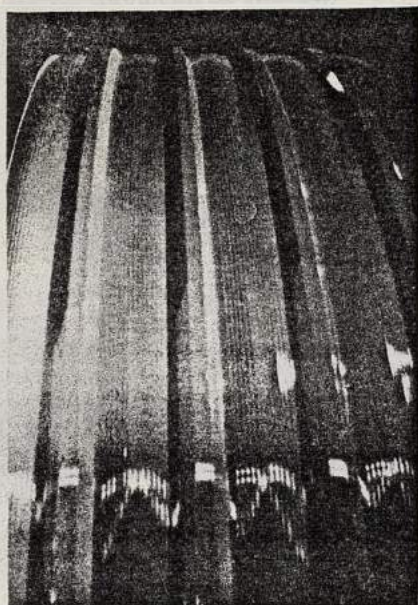
Machine à profiler équipée de galets pour palplanches.



Plancher « collaborant ».
Les tôles d'acier galvanisé participent à la résistance
de l'ensemble.



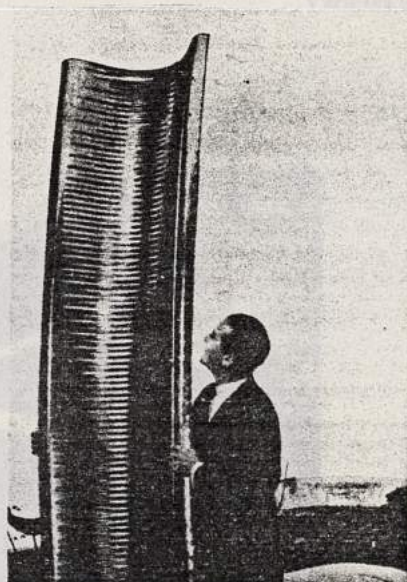
Battage de palplanches.



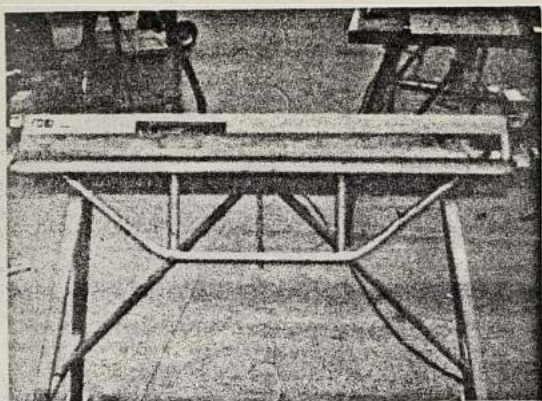
Divers éléments en tôles plissées et cintrées (acier, aluminium, cuivre).



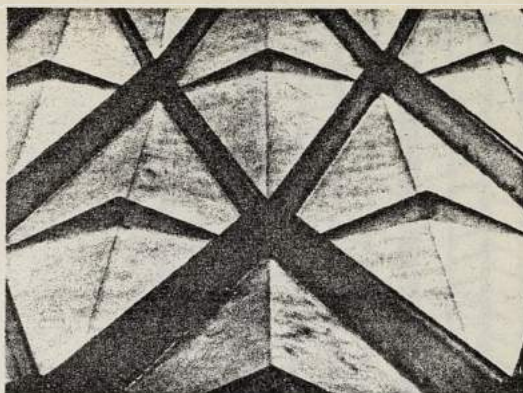
Montage d'un élément de couverture de grande longueur en tôle d'acier galvanisé nervuré et cintré.



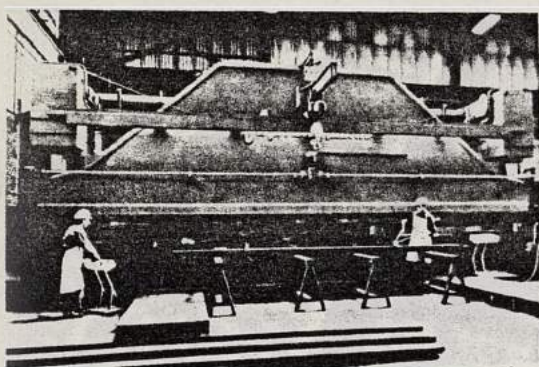
1960 — Élément plissé et cintré destiné aux toitures des équipements agricoles ou commerciaux.
« Wonder buiding Corp. », U.S.A.



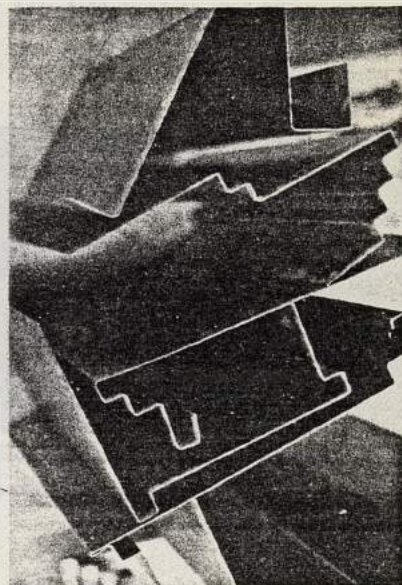
Pieuse-enrouleuse de chantier.



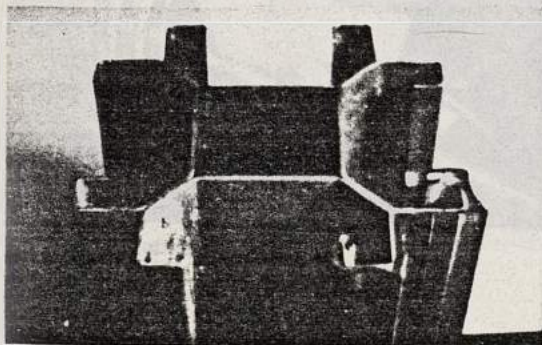
1965 — Éléments en tôle d'acier pliée.
R. Piano, Gênes, Italie.



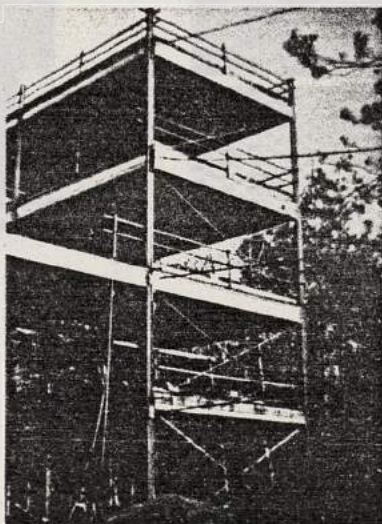
Presse plieuse à matrice. Force : 1 200 tonnes.



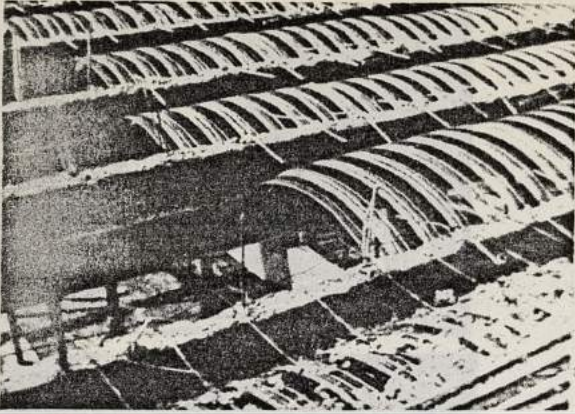
Variétés de tôles plissées.



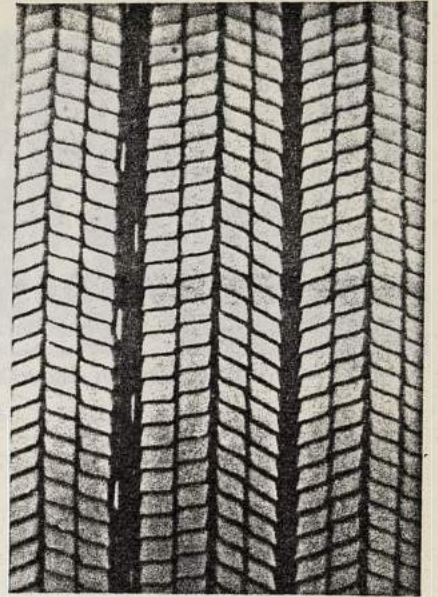
Composants d'ossature métallique en acier galvanisé profilé à froid. Duclot & Petroff.



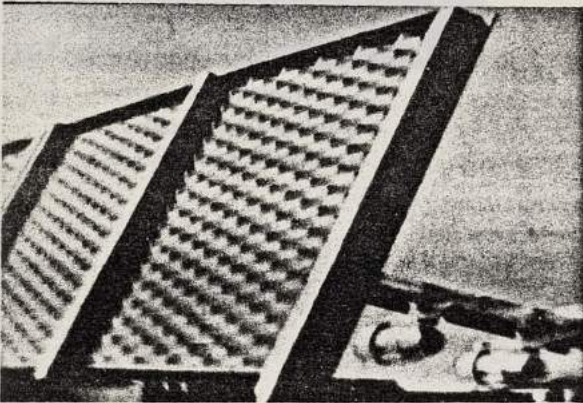
Bâtiment laboratoire (C.E.B.T.P.).
Duclot et Petroff.



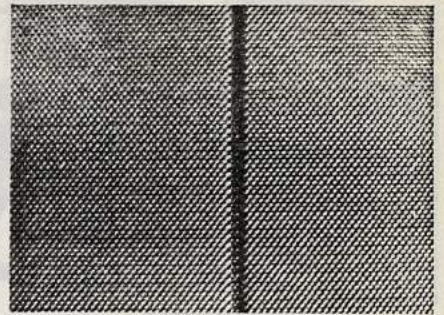
Élément de coffrage perdu sous forme de voutain.
Métal déployé-cintré.



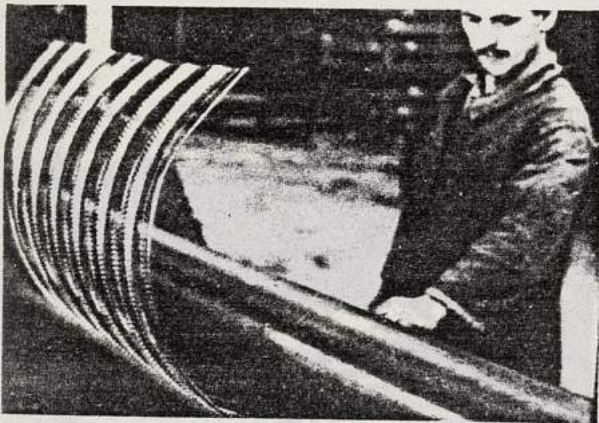
Métal déployé destiné à l'armature
des bétons.



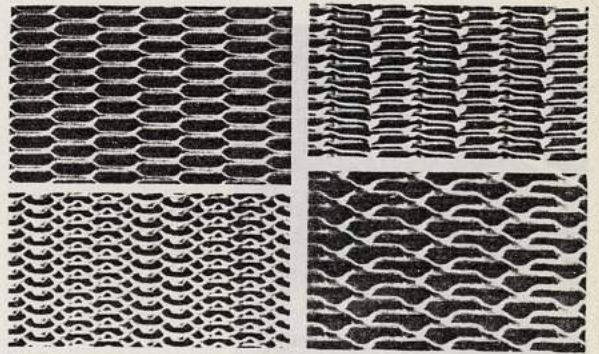
Déflecteurs. Aéroport Orly-Sud, France.



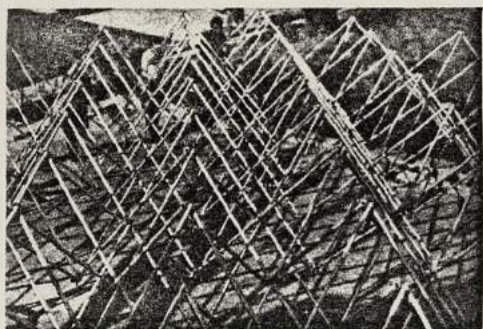
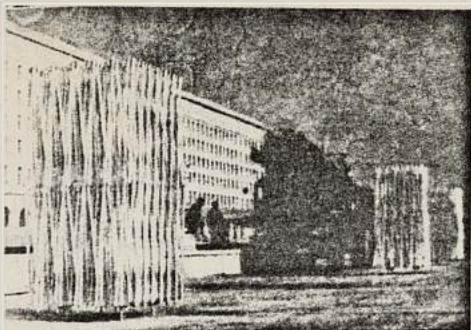
Déployé micro-maille utilisé sur haut-
parleur de téléviseur.



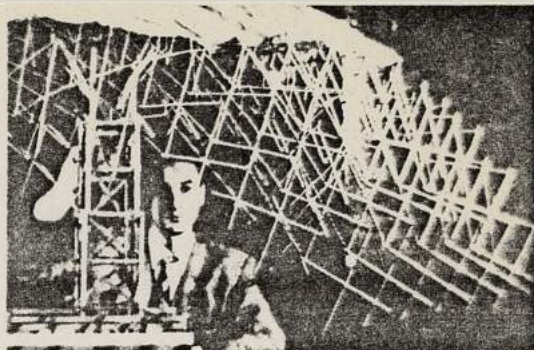
Cintrage d'une tôle déployée.



Différentes géométries de tôles déployées.



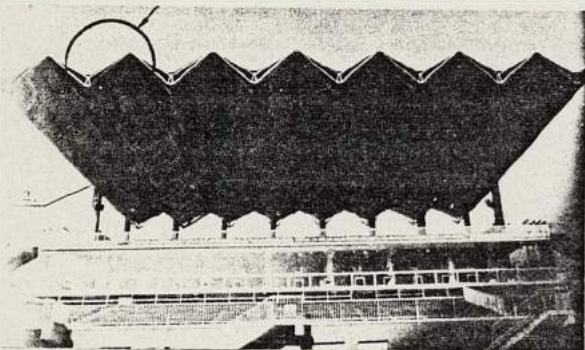
1964 — Structures pliables.
Pavillon pour expositions.
E.P. Pineros (Espagne).



1967 — Coupole réticulée pliable. E.P. Pineros
(Espagne).



1960 — Ecole élémentaire. Fernando Rivera
Ciampi. (U.S.A.)



Hippodrome. Strasbourg, France.
Kronenberger, Ittel et Strohmenger.



Montage d'éléments de vêtements
en aluminium.
Normko & Silberkuhl (R.F.A.).

1800 : Depuis la haute antiquité égyptienne (mobilier).

Contre-plaqué : A partir de 1850 par les Américains (U.S.A.), Henry Biber.

1854 : Premier brevet déposé à Londres pour la fabrication industrielle du contre-plaqué.

1855-1856 : « Balcony France ».

1855 : Utilisation de la sciure de bois pour l'isolation. Utilisation de l'écorce de bouleau pour parer vapeur.

1855 : Premier usage de bois de 11. Tournier, Bois chanté.

1856 : Invention du contre-plaqué moulu.

1856 : A. Aalto découvre des meubles en contre-plaqué moulu.

1857 : Usage de Gerald Sumner.

1858 : Tube isolé « Le Ricœur » - Contre-plaqué ondulé.

Placage : Depuis la haute antiquité égyptienne (mobilier).

Contre-plaqué : A partir de 1850 par les ébénistes (U.S.A.). Henry Belter.

1884 : Premier brevet déposé à Londres pour la fabrication industrielle du contre-plaqué.

Vers 1850 : « Baloon Frame ».

Vers 1850 : Utilisation de la sciure du bois pour l'isolation. Utilisation de l'écorce de bouleau pour pare-vapeur.

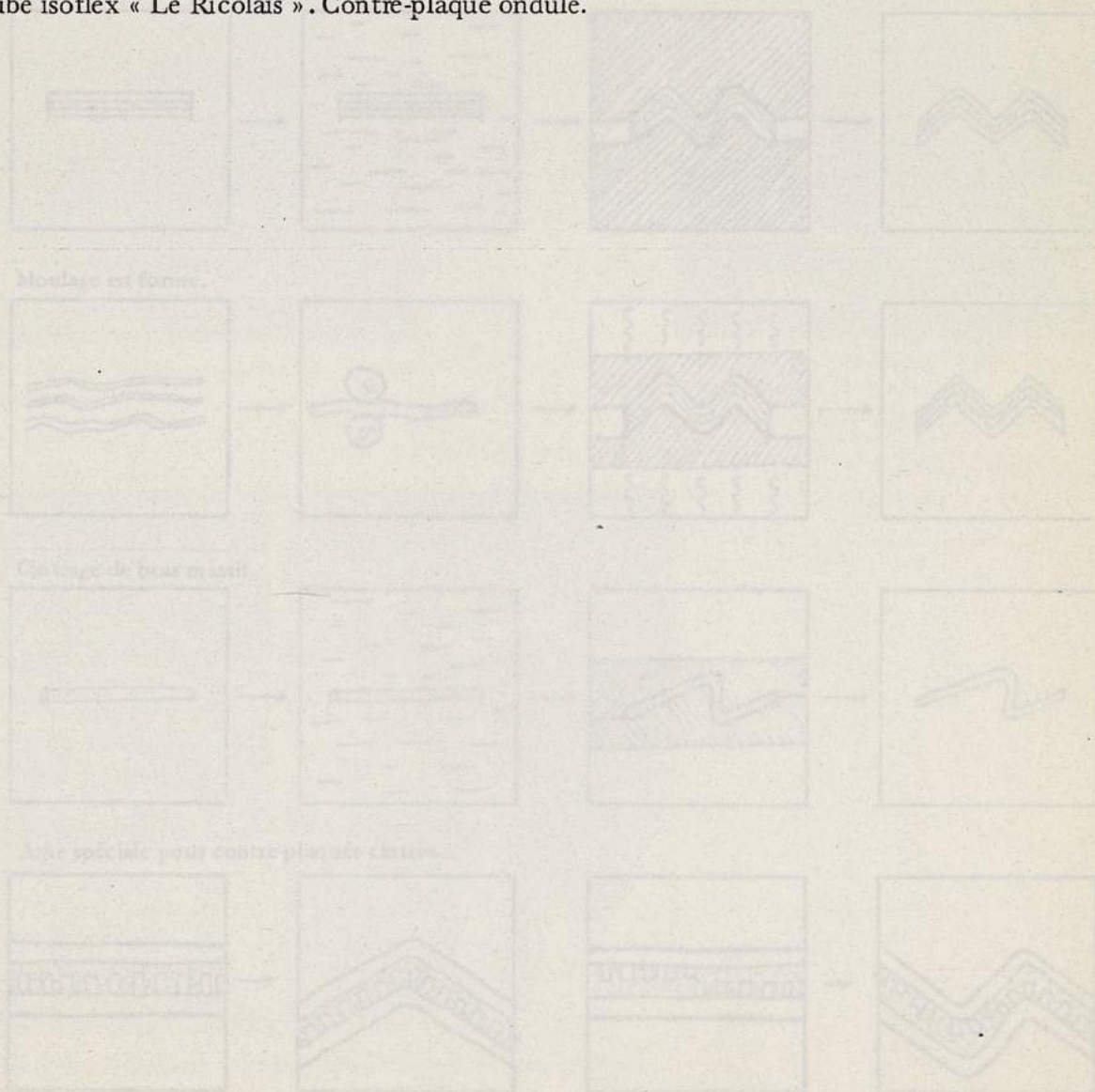
Vers 1850 : Première chaise de série de M. Thonet. Bois cintré.

Vers 1930 : Invention du contre-plaqué moulé.

Vers 1930 : A. Aalto dessine des meubles en contre-plaqué moulé.

1934 : Chaise de Gerald Summers.

1946 : Tube isoflex « Le Ricolais ». Contre-plaqué ondulé.



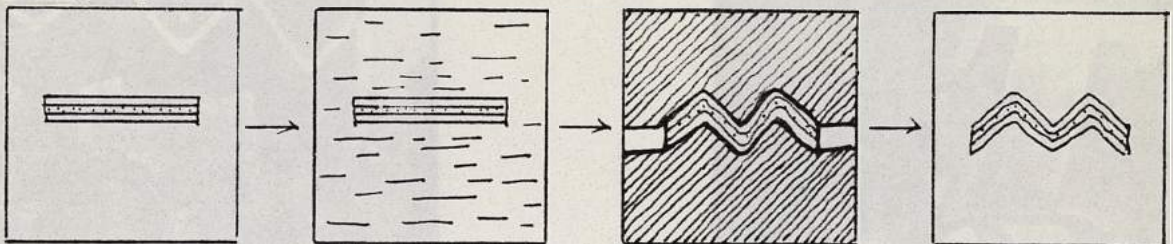
Différentes techniques sont utilisées pour former le bois.

– Le cintrage : le plus ancien des procédés. Il consiste à provoquer, par exposition à la chaleur ou par étuvage le ramolissement des matières pectiques formant la liaison des fibres de bois. Celui-ci devient alors assez plastique pour pouvoir prendre une certaine courbure. Il est fixé sur un moule ou conformateur, à la forme désirée. Par séchage, il se stabilise.

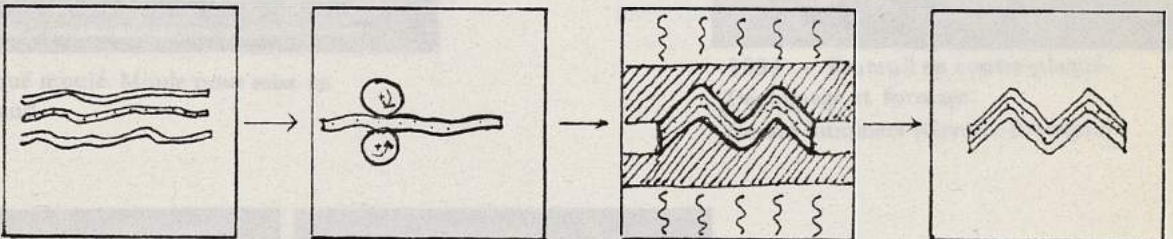
– Le moulage en forme : les plis sont encollés et disposés un à un sur une forme, les différentes feuilles sont ainsi pressées à chaud.

Il est à noter l'existence de contre-plaqués à âmes entaillées qui permettent le cintrage à froid.

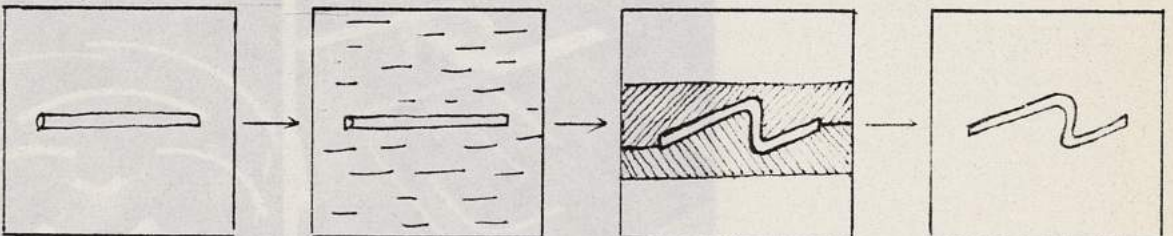
Moulage de plaques.



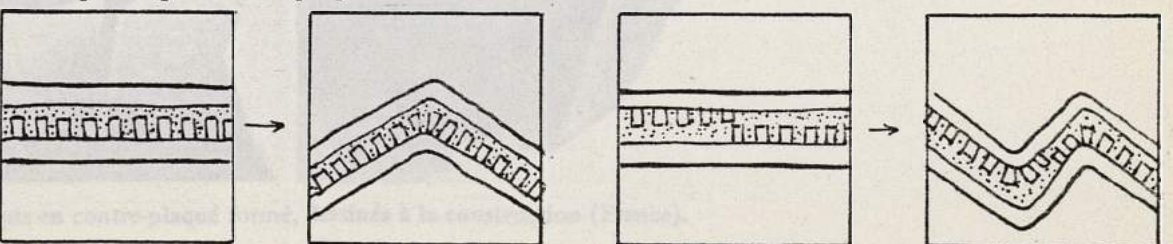
Moulage en forme.

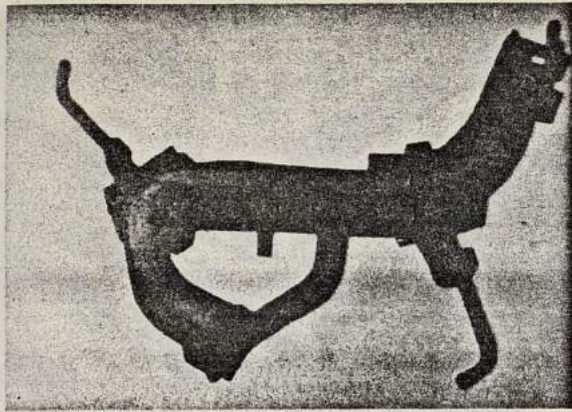


Cintrage de bois massif.



Âme spéciale pour contre-plaqués cintrés.

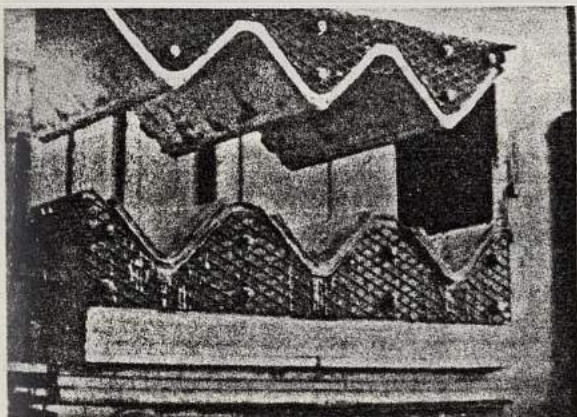




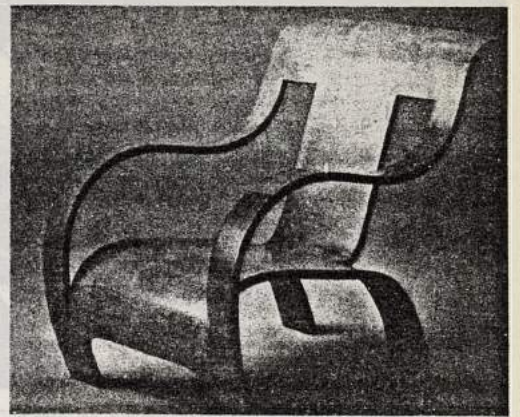
1850 — Conformateur pour le cintrage du bois.
M. Thonet (Autriche).



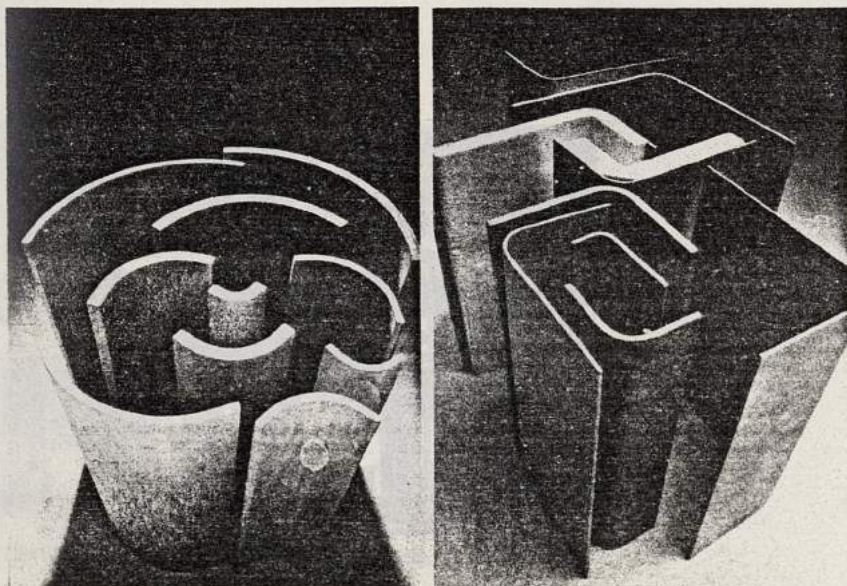
1850 — Meuble en bois cintré.
M. Thonet (Autriche).



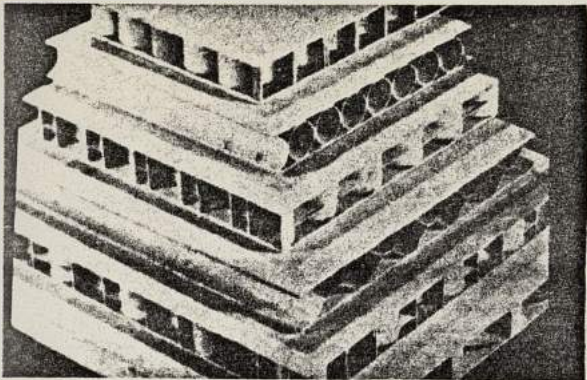
Contre-plaqué moulé. Moule pour mise en
forme à chaud.



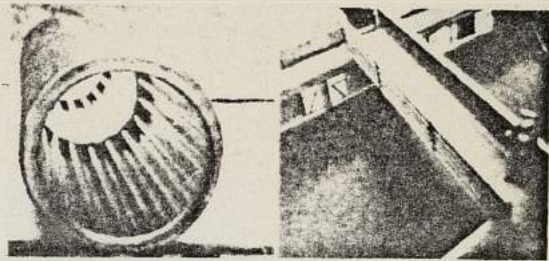
1934 — Fauteuil en contre-plaqué.
Découpage et formage.
Gerald Summers (Grande-Bretagne).



Divers éléments en contre-plaqué formé, destinés à la construction (France).



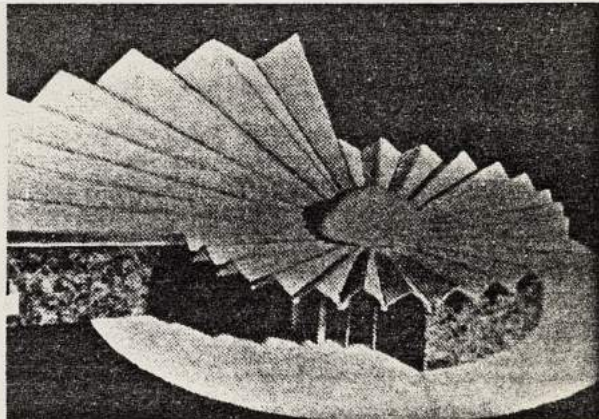
1946 — Cloisons à âme alvéolaire en bois plissé.
France.



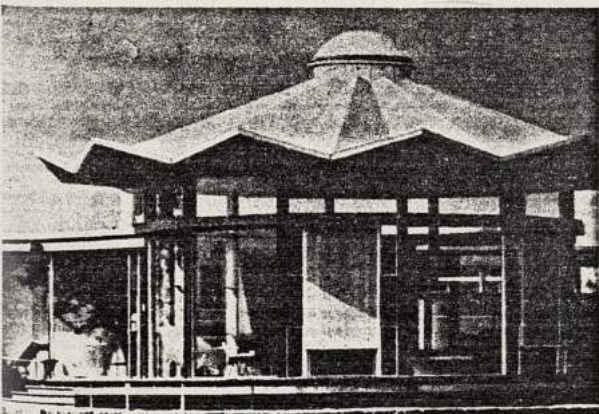
1946 — Tube et passerelle « isoflex » en bois.
Le Ricolais (France).



1960 — Eglise en contre-plaqué. St-Louis, Missouri,
U.S.A. Manske, Dieckmann.



1961 — Salle de conférences. Piscataway township.
New-Jersey, U.S.A. Mc Dowell & Goldstein.



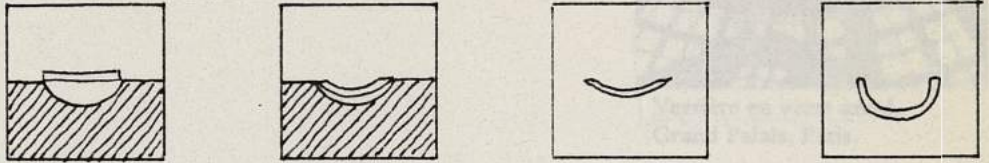
1959 — Séjour d'habitation individuelle (U.S.A.).

1500. - Première fabrication et utilisation du verre en Egypte.
1543. - Mise au point de la technique de verre soufflé par les Syriens.
1688. - Brevets du verre plat par Tenner (Grande-Bretagne), Bécoulet et Bollet (France).
1814. - Brevet de la technique de fabrication du verre trempé par Alfred Royet de la Bastie (France).
1848. - Brevet de la fabrication du verre plat armé par Léon Appert (France).
1862. - Mise au point de la fabrication du verre plat par Emile Foucault (Belgique).
1870. - Bénédictus découvre les propriétés adhésives de la nitrocellulose sur le verre.
1878. - Première fabrication de verre triplex en France.

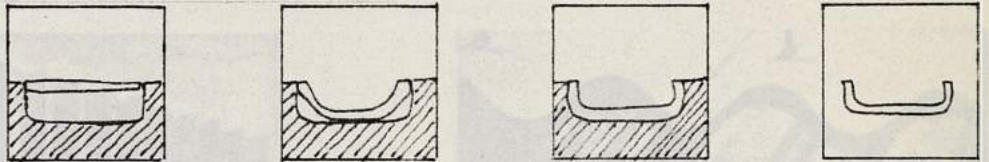
- 1500. — Première fabrication et utilisation du verre en Egypte.
- 200. — Mise au point de la technique de verre soufflé par les Syriens.
- 1850. — Brevets du verre plat par Tenner (Grande-Bretagne), Bécoulet et Bellet (France).
- 1874. — Brevet de la technique de fabrication du verre trempé par Alfred Royer de la Bastie (France).
- 1893. — Brevet de la fabrication du verre plat armé par Léon Appert (France).
- 1902. — Mise au point de la fabrication du verre plat par Emile Foucault (Belgique).
- 1910. — Benedictus découvre les propriétés adhésives de la nitrocellulose sur le verre.
- 1920. — Première fabrication de verre triplex en France.



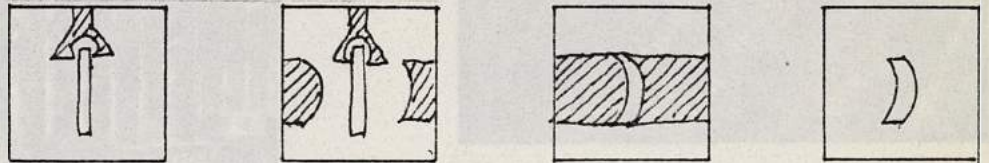
Cintrage cylindrique ou sphérique.



Cintrage sur longue portée.



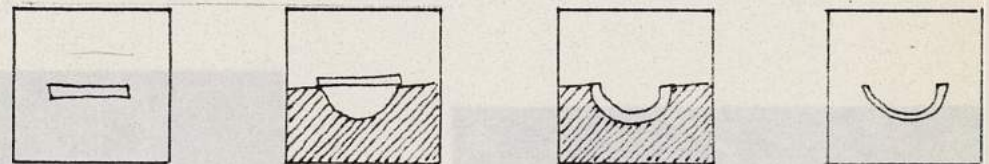
Cambrage (verre de grande dimension).



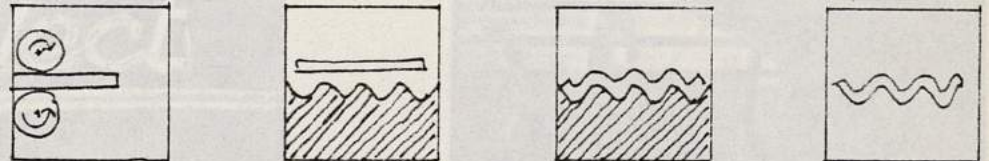
Bombage « sur sable ».

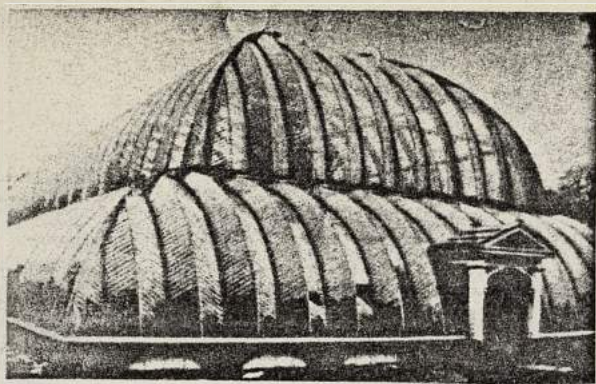


Bombage matriciel.

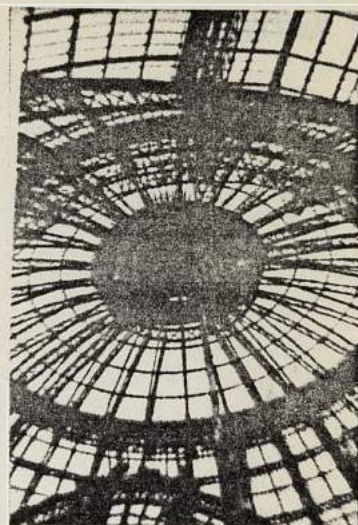


Conformateur.

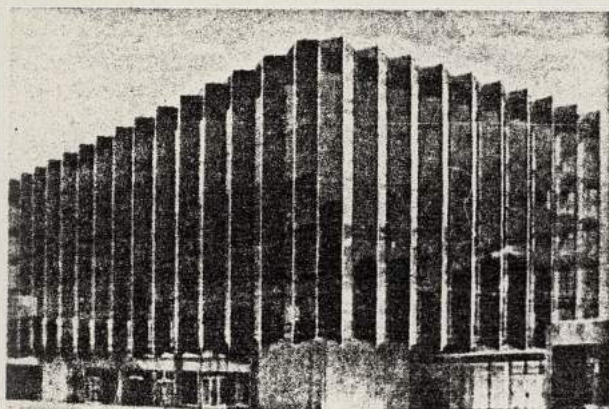




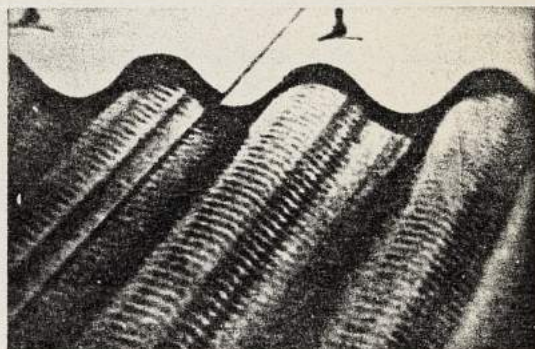
XIXe s. Serre de verre. Grande-Bretagne. Paxton.



Verrière en verre armé.
Grand Palais, Paris.



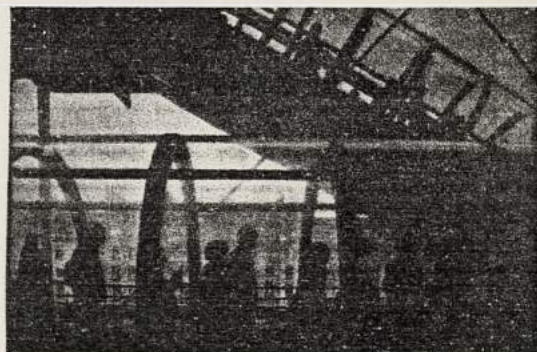
1959 — Mur rideau à structure plissée. « Law School »,
University of Chicago. Eero Saarinen.



Verre ondulé.



Tube de verre cintré.



1977 — Verre. Centre culturel Beaubourg, Paris
(France). Piano & Rogers.

1300-1400 — Fabrication des carreaux de plâtre (découverts sous le parvis de Notre-Dame à Paris et dans la région de Meaux).

1400-1500 — Les écrivains emploient le plâtre dans la construction de leur scriptorium ainsi que dans la fabrication de pierres tombales par moulage (Villers-la-Ville, etc.).

1500-1600 — Maçonnerie, plâtre à sec, plâtre à peindre.

1600-1700 — 18 carrières de plâtre dans la région parisienne en 1673. Première levée de plâtre des pays de la Seine, encaimés.

1700-1800 — Décoration par plâtre à sec.

1800-1850 — En 1667, Louis XIV impose le recouvrement de plâtre extérieur et intérieur pour protéger contre le feu.

1850-1900 — 95 % des constructions neuves sont faites au plâtre.

1900-1950 — Dumoulin inventeur du four à plâtre et de carreaux pour murs de séchage et de cloisons.

1950-1960 — Production en grande série des carreaux de plâtre.

1960-1970 — Sacket et Kane inventent la plaque de plâtre dans les ateliers de la « New-York Coaltar & Chemical Co. », U.S.A.

1970-1980 — Implantation de la plaque de plâtre en Europe.

PLATRES – HISTORIQUE

IIIe siècle – Fabrication des carreaux de plâtre (découverts sous le parvis de Notre-Dame à Paris et dans la région de Meaux).

Les mérovingiens employèrent le plâtre dans la construction de leurs sarcophages ainsi que dans la fabrication de pierres tombales par moulage (VIIe et VIIIe siècles).

XIIe siècle : Maçonnerie, plâtre à stuc, plâtre à plancher.

XIIIe siècle : 18 carrières de plâtre dans la région parisienne en 1292. Enduits, hourdage des pans de bois, cheminées.

Renaissance : Décoration par plâtre à stuc.

XVIIe siècle : En 1667, Louis XIV impose le revêtement de plâtre extérieur et intérieur pour lutter contre le feu.

XVIIIe siècle : 95 % des constructions neuves sont faites au plâtre.

XIXe siècle – Dumesnil inventeur du four à plâtre et de carreaux pour murs de réfend et de cloisons.

1929 – Production en grande série des carreaux de plâtre.

1890 – Sacket et Kane inventent la plaque de plâtre dans les ateliers de la « New-York Coaltar Chemical Co. », U.S.A.

1917 – Implantation de la plaque de plâtre en Europe.



Prototyp. Coque alvéolaire
(alvéolaire plâtre).

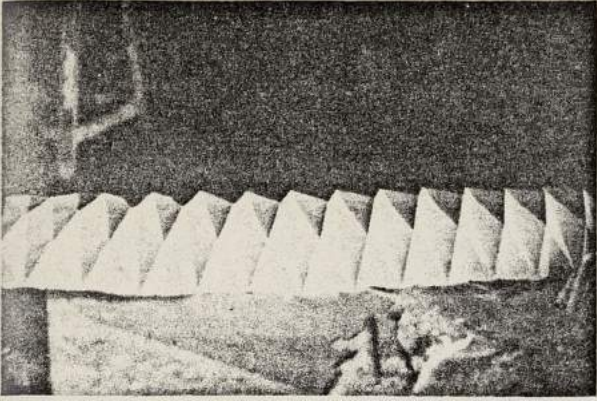


Prototyp. Coque alvéolaire de plâtre.

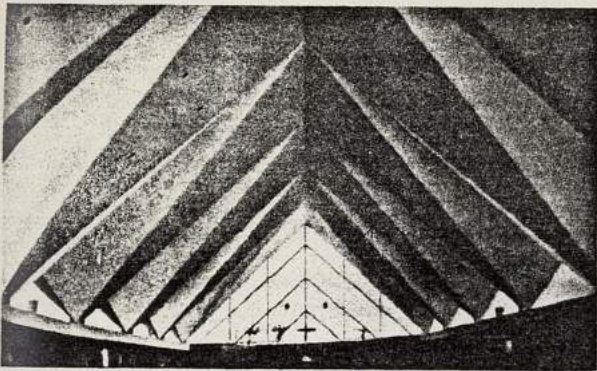
PLASTIQUES

TEXTILES

CONFLABLES



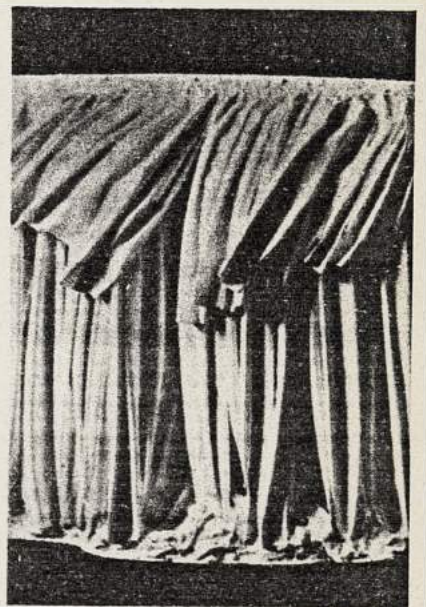
1984 — Travaux d'étudiants. Ecole d'architecture de Nantes. France.



Utilisation du plâtre. Eglise. Welton Becket | (U.S.A.).



1983 — Prototype. Coque alvéolaire (voiles funiculaires plissées). Paris, France.



Sculpture. Textile imprégné de plâtre.

PLASTIQUES

TEXTILES

GONFLABLES

CHRONOLOGIE - HISTORIQUE

- 1828 - Robert Moake prévoit la possibilité d'une substance artificielle.
- 1831 - Préparation du chlorure de vinyle par Berzelius.
- 1837 - Utilisation de la « Gutta serena » aux U.S.A. par le Dr. Thompson.
- 1841 - Berzelius fabrique le premier polystyrène.
- 1844 - Découverte du polymère.
- 1845 - Alexandre Parkes, professeur de chimie à Birmingham (Angleterre) expérimente un mélange de camphre et de stéarolite qu'il baptise sous le nom de « Parkesine ».
- 1847 - Mise au point par Samuel Park (U.S.A.) de la première presse à mouler des objets en genre laqué.
- 1848 - Présentation de la « Parkesine » à l'exposition de Londres.
- 1849 - Brevet de la « Parkesine ».
- 1850 - Schützenberger produit de l'acétate de cellulose.
- 1851 - Synthèse du styrène par Berzelius.
- 1860 - John Wesley Hyatt brevète un matériau nouveau, le celluloid (nitrate de cellulose).
- 1867 - Brevet du « celluloid » déposé par Hyatt (U.S.A.).
- 1868 - Les frères Hyatt mettent au point la première machine à rotulage des plastiques par injection.
- 1869 - Brevet de la césine déposé en Allemagne.
- 1870 - Eastman commercialise le film celluloid.
- 1872 - Gray obtient le brevet de la première filière à vis.
- 1873 - Polymérisation du méthylacrylate par Kohlbaum.
- 1874 - Première soie artificielle produite par Chardonnet.
- 1875 - La soie de viscose est exploitée et mise en vente par Cross et Bevan.
- 1876 - Définition des polycarbonates par Eichorn.
- 1878 - Production en film d'un nitrate de cellulose.
- 1880 - Krich et Spittler déposent le brevet de la Galalith (plastique à césine).
- 1882 - Leo Baekeland, chimiste belge, dépose son brevet (bakélite) aux U.S.A.
- 1883 - Synthèse du chlorure de vinyle et de l'acétate de vinyle par Krich.

PLASTIQUES – HISTORIQUE.

- 1664 – Robert Hooke prévoit la possibilité d'une substance artificielle.
- 1831 – Préparation du chlorure de vinyle par Regnault.
- 1843 – Utilisation de la « Gutta percha » aux U.S.A. par le Dr Montgomerie.
- 1847 – Berzelius fabrique le premier polyester.
- 1845 – Découverte du polymère.
- 1859 – Alexandre Parkes, professeur de sciences naturelles à Birmingham (Angleterre) expérimente un mélange de camphre et de nitrocellulose qu'il désigne sous le nom de « Parkesine ».
- 1852 – Mise au point par Samuel Peck (U.S.A.) de la première presse à mouler des objets en gemme laqué.
- 1862 – Présentation de la « Parkesine » à l'exposition de Londres.
- 1865 – Brevet de la « Parkesine ».
- 1865 – Schützenberger produit de l'acétate de cellulose.
- 1866 – Synthèse du styrène par Berthelot.
- 1868 – John Wesley Hyatt brevète un matériau nouveau, le celluloid (nitrate de cellulose).
- 1870 – Brevet du « celluloid » déposé par Hyatt (U.S.A.).
- 1872 – Les frères Hyatt mettent au point la première machine à moulage des plastiques par injection.
- 1885 – Brevet de la caséine déposé en Allemagne.
- 1889 – Eastman commercialise le film celluloid.
- 1879 – Gray obtient le brevet de la première filière à vis.
- 1880 – Polymérisation du méthylacrylate par Kohlbaum.
- 1884 – Première soie artificielle produite par Chardonnet.
- 1892 – La soie de viscose est exploitée et mise en valeur par Cross et Bevan.
- 1898 – Définition des polycarbonates par Einhorn.
- 1899 – Production en film continu de nitrate de cellulose.
- 1899 – Kritche et Spitteler déposent le brevet de la Galalithe (plastique à caséine).
- 1907 – Leo Baekeland, chimiste belge, dépose son brevet (bakélite) aux U.S.A.
- 1912 – Synthèse du chlorure de vinyle et de l'acétate de vinyle par Klatte.

- 1915 – Cellulose régénérée (par Brandenberger, France).
- 1925 – Première tentative de commercialisation du styrose aux U.S.A.
- 1927 – Plexiglass (polyméthacrylate de méthyle) par Wulff, en Allemagne.
- 1929 – Redécouverte par Chalmers du polyméthacrylate de méthyle.
- 1931 – PVC (polyvinyle) par Ostromylenski, Allemagne.
- 1934 – Commercialisation du plexiglass.
- 1933 – Polyéthylène par Fawcett et Gibson, Grande-Bretagne.
- 1938 – Nylon par Carothers, U.S.A.
- 1939 – Commercialisation du polyéthylène.
- 1940 – Développement du thermoformage, applications militaires (U.S.A., Allemagne).
- 1943 – Téflon (polyfluore), par Dupont de Nemours (U.S.A.).
- 1943 – Castan dépose le brevet de l'époxyde (Suisse).
- 1946 – A.B.S. (acrylonitrile butadiène styrène) par Daly et Calvert (U.S.A.).
- 1946 – Polyamide-11 par Zelner et Genas (France).
- 1947 – Production de l'époxyde.
- 1950 – Production du téflon.
- 1950 – Polyuréthane par Otto Bayer (R.F.A.).
- 1951 – Polystyrène expansé par Otto Bayer (R.F.A.).
- 1953 – Polyacétal par Mac Donald (U.S.A.).
- 1955 – Polyéthylène h.d. (haute densité) par Ziegler (R.F.A.).
- 1957 – Polypropylène par Natta (Italie).
- 1957 – Polycarbonate par Schnell (R.F.A.).
- 1964 – Polyphénylène par Hay (U.S.A.).
- 1964 – Polyimide par Dupont de Nemours (U.S.A.).
- 1965 – Polysulfone par Union Carbide (U.S.A.).
- 1965 – Polyméthyle-pentène par I.C.I. (Grande-Bretagne).
- 1970 – Polyphénylène sulfone, Philips Petroleum (U.S.A.).
- 1975 – Ionomère par Dupont de Nemours (U.S.A.).

PRINCIPALES MATIÈRES
PLASTIQUES THERMOFORMABLES

PS choc (polystyrène).
PVC rigide (polychlorure de vinyle).
PMMA (polyméthacrylate de méthyle)
ABS (styrène).
PP (polypropylène).
PE hd (polyéthylène).
PE bd.
PVC souple (polychlorure de vinyle).
Polyamides.
Polyesters thermoplastiques.
Polycarbonates.

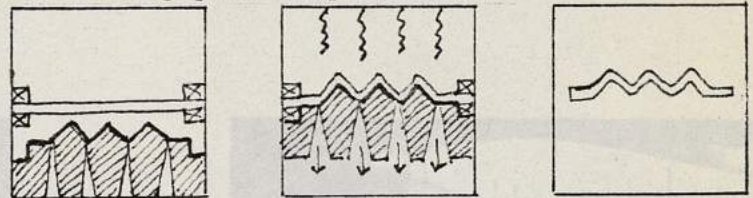
Principaux procédés de thermoformage :

Formage négatif simple.
Formage négatif avec préformage mécanique.
Formage positif.
Formage positif simple (drapage).
Formage sur squelette.
Formage à la graisse.
Drapage à la main.
Formage positif avec préformage pneumatique (bullage).
Formage positif avec préformage mécanique.
Formage positif avec préformages pneumatique et mécanique combinés.
Formage entre moule mâle et femelle.

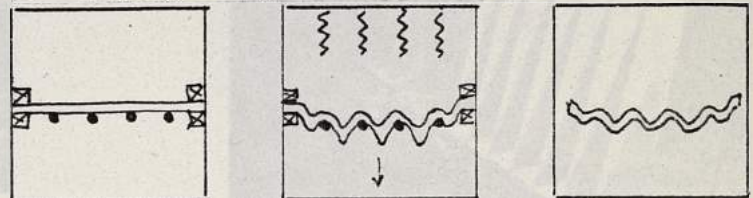
1. — Formage négatif simple.



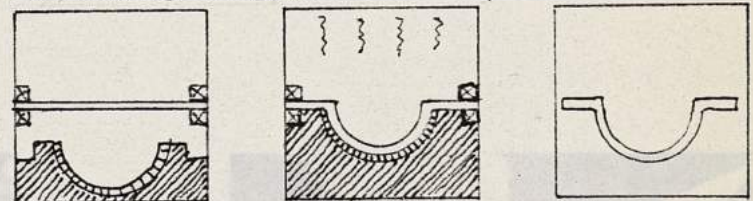
2. — Formage positif simple (drapage).



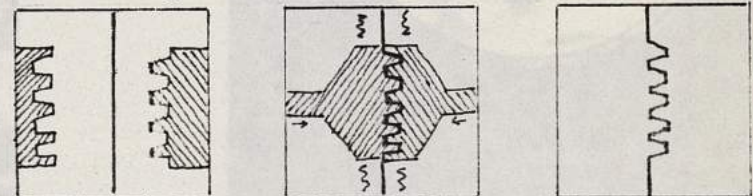
3. — Formage sur squelette.

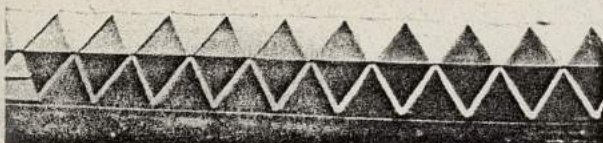


4. — Formage à la graisse.



5. — Formage entre moules mâle et femelle.

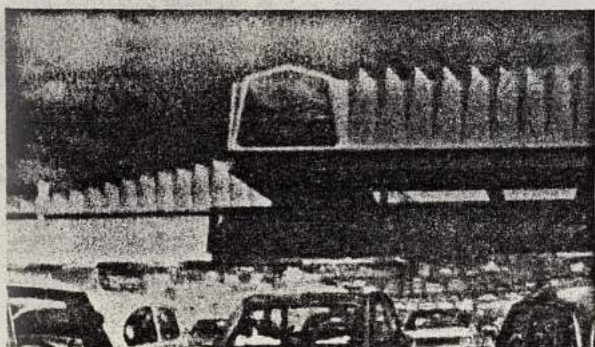




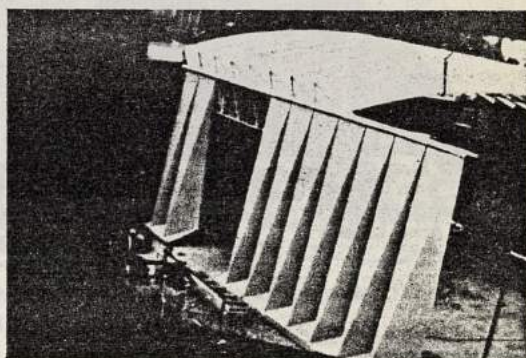
1966 — Eléments en polyester renforcé. Structure mobile. Pomezia, Italie. R. Piano.



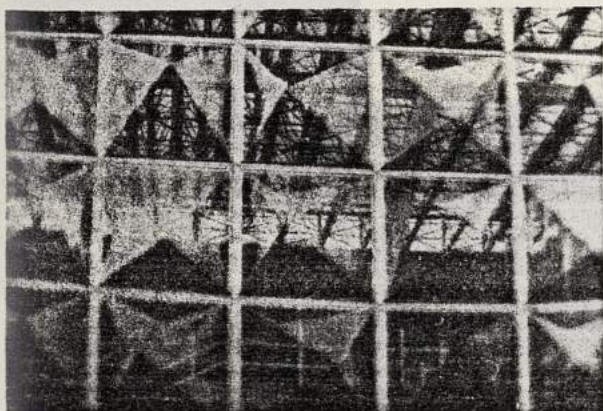
Polycarbonate transparent | cintré à froid.



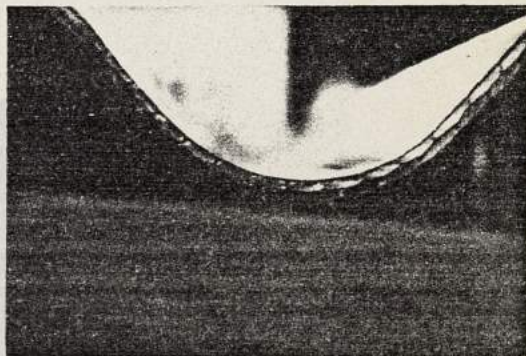
Passerelle. Androssan, Ecosse. Law, Dunbart & Nasmith.



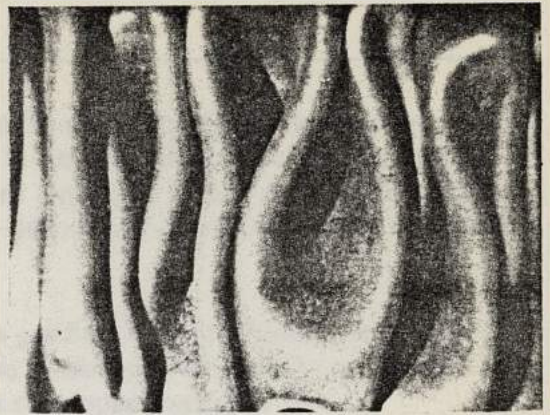
Coques assemblées | Scott Bader Services Ltd
Polyester armé. (Grande-Bretagne).



Enveloppe. Coques en acrylique. « Derby castle solarium ». Gillinson, Barnett & Partners.



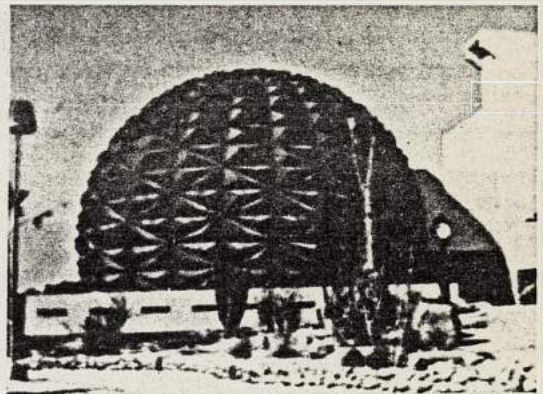
Feuille de plastique souple
à âme alvéolaire (Italie).



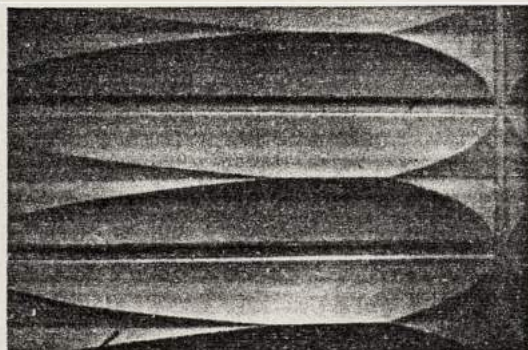
Déformation plastique due à un essai d'écrasement. R. Piano (Italie).



Fauteuil plissé. Spiros Zakas.



Musée. San Bernardino, California, U.S.A.
UTN Consolidated Inc.



Panneaux de façade thermoformés en PVC. Hostalit-z (R.F.A.).

TEXTILES

Les textiles se doivent d'être classés, dans le cadre de cette étude, dans la catégorie des plastiques. Outre les utilisations classiques des tissus dans le domaine de la construction (armatures destinées aux plâtres, bétons et résines), ou encore dans la fabrication de tentes, de bâches de chantier et d'éléments d'accompagnement de l'architecture, il faut citer leurs utilisations dans la réalisation de structures gonflables.

Le cas des gonflables (structures à support d'air ou structures gonflées à l'air) est intéressant; il a autorisé des progrès constants dans l'amélioration du matériau et des procédés de mise en œuvre. Les principales qualités requises pour les textiles destinés aux structures gonflables sont :

1. - L'étanchéité.
2. - L'imperméabilité.
3. - La résistance aux ultra-violets.
4. - L'ininflammabilité.
5. - La durabilité.

Principaux textiles employés :

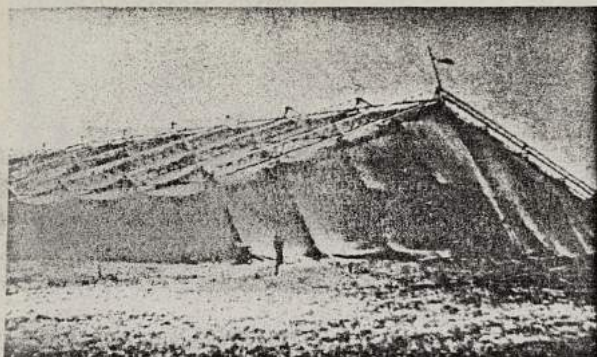
- Polyamide (nylon) enduit de PVC, de vinyle, d'élastamère, de néoprène et de polyuréthane.
- Polyester (tergal, trévira) enduit de PVC.
- Térylène enduit de néoprène.
- Fibre de verre enduite de PVC ou de téflon.

Principaux films employés :

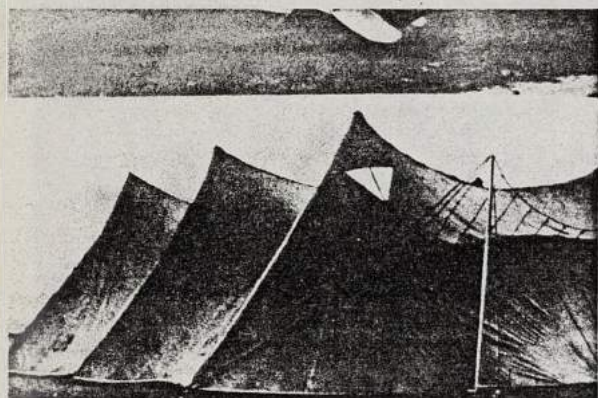
- PVC transparent (cristal).
- Polythène.
- Mylar/melinex.

Suivant les classes de textiles ou de films, les techniques d'assemblage diffèrent :

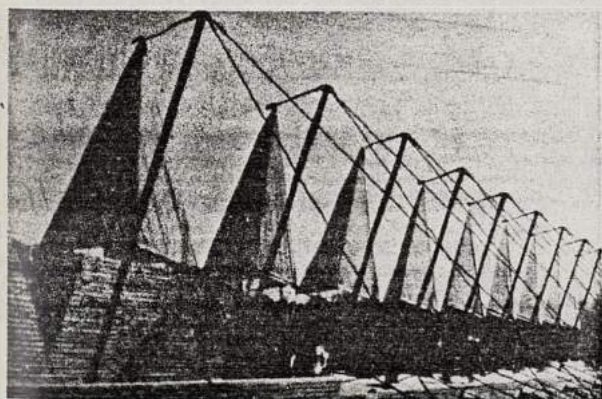
- Collage à froid (nylon).
- Vulcanisation à chaud (nylon).
- Thermo-soudage (nylon, polythène).
- Soudage hautes fréquences (PVC).
- Laçage.
- Boulonnage.



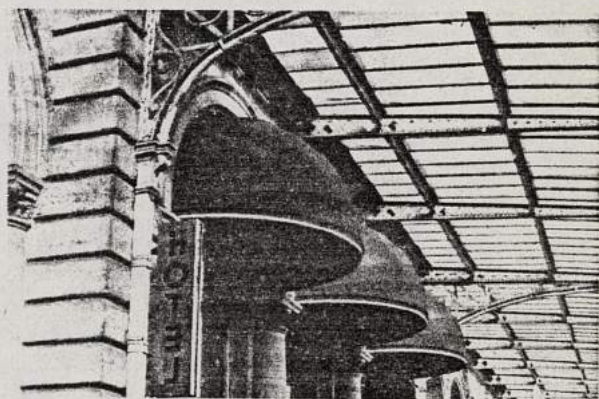
1938 — Tente de l'armée de l'air type MZL3 (Allemagne).



1959 — Tente ondulée. Hangar d'aviation (Allemagne).



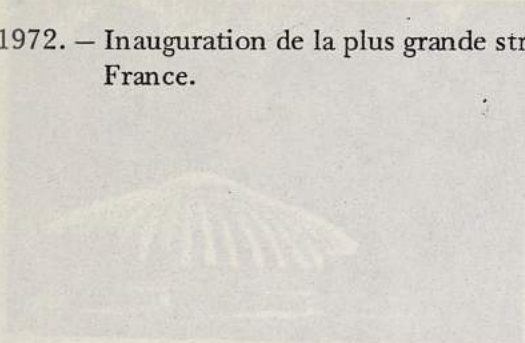
1972 — Structure de tente supportée par mât et cable. Leipzig, R.D.A. Dewag.



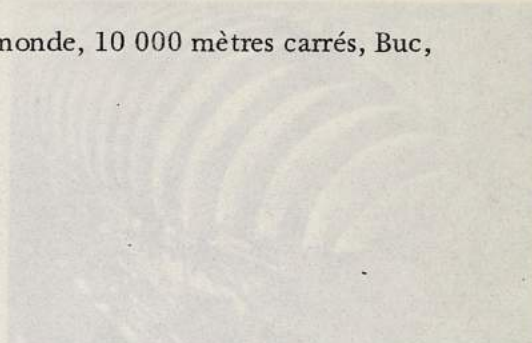
Encorbellements de berceaux en toile, Paris, France.

STRUCTURES GONFLABLES – HISTORIQUE

1783. – Premières expériences des frères Mongolfier.
1883. – Premier dirigeable.
1888. – James Boyd Dunlop invente le pneumatique.
1917. – Grande-Bretagne : Dépôt du premier brevet d'une structure gonflable par F. W. Lanchester conception d'un hôpital de campagne de 400 mètres de diamètre, pression intérieure : 0,11 PSI.
1942. – Conception d'un projet de structure gonflable de 100 mètres de diamètre et de pression intérieure de 0,06 PSI.
1956. – Première fabrication commerciale des structures pneumatiques par Walter Bird (Birdair Structures), U.S.A.
1964. – Israël : Dépôt du premier brevet de « coffrages gonflables ».
1972. – Inauguration de la plus grande structure gonflable du monde, 10 000 mètres carrés, Buc, France.



1952 – Structure pneumatique, Exposition internationale, Turin, Urbino, Naples, Lomazzo.



1956 – Structure pour les navires désempés (U.S.A.).



1956 – Birdair Structures (U.S.A.).



1964 – Mobile de l'U.S. Air Force.



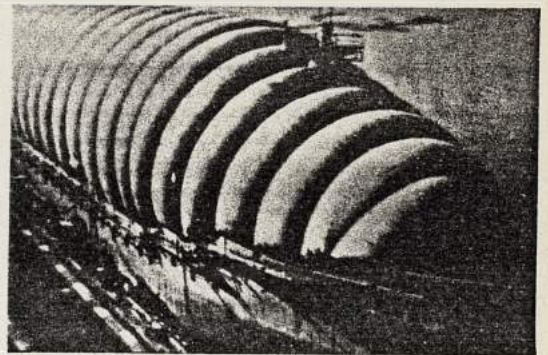
16e s. — Matelas pneumatique
réalisé en cuir cousu.



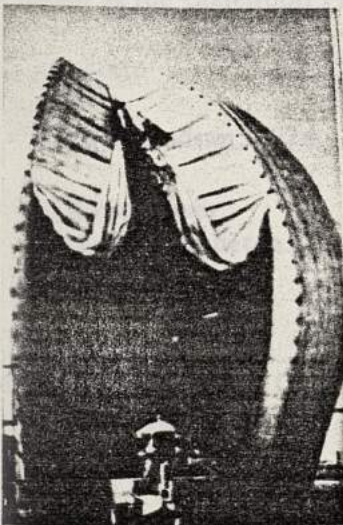
1965 — Premier fauteuil entièrement
gonflable (France). B. Quentin.



1972 — Structure pressostatique, Exposition
Eurodomus, Turin. Urbino, Depas, Lomazzi.



Protection pour les navires désarmés (U.S.A.).



Radome « Birdair Structures »
(U.S.A.).



Abri mobile de l'U.S. Air Force.

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE ET SOURCES

G. Winter, A.H. Wilson, L.C. Urquhart, C.E. O'Rourke (Cornell University)
Design and concrete structures
Mc Graw-Hill Book Company

P. Guedes
The Mac Millan encyclopedia of architecture and technological change
Mac Millan, London, 1979

D.S. Waite
Architectural elements (The technological revolution)
Bonanza Books, New-York, 1972

W. Henn
Atlas de construction industrielle
Dunod, 1961

Joe Dicke
Architecture contemporaine
Delpire, 1958

U. Conrads et H.G. Sperlich
Phantastische Architektur
Verlag Gerd Hadje, 1960

C. Siegel
Strukturformen der Modernen Architektur
Callwey, 1970

The encyclopedia of inventions
Marshall Cavendish, 1974

A history of technology
Oxford at the Clarendon Press

E. De Bono
Eureka
Thames et Hudson, 1974

P.G. Wiescherman
Construction en béton
Eyrolles, 1970

G. Sebestyen
Lightweight Building Construction
Akademiai Kiado, 1977

R. Piano
Projets et architectures 1964-1983
Electa Moniteur, 1983

J.S. Lebedew
Architektur und Bionik
VEB Verlag, 1983

PÉRIODIQUES

Architectural Forum
Progressive Architecture
Bauen + Wohnen
Acier dans le Monde
Acier/Stahl/Steel
Architecture d'aujourd'hui
Architecture et technique
Architectural design
La Nature
Neuf
DBZ Entwurf
Werk
Bâtiment international
Bâtir
Le Génie civil

PLASTIQUES

R.L. Butzko.
Plastic sheet forming.
Rheinhold Publications, U.S.A., 1958.

W. Leene.
La thermoformabilité des plastiques.
In Formage des matériaux n°2/5, 1969/1970.

Claude Lindenlaub.
Thermoformage.
In Technique de l'ingénieur, France.

A. Quarmby
« Plastics and architecture »
Prager publishers, 1974

S. Katz
Plastics
Studio Vista, 1978

F. Mark
Les matières plastiques
Life (Le monde des sciences), 1966

M. Reyne
L'utilisation industrielle des plastiques
L'Usine nouvelle, 1982

J. Harry Dubois
History of plastics
Cahners, Boston, U.S.A.

MÉTAUX

Wei-Wen Yu

Cold formed steels structures.

Mc Graw Hill, 1973

B. Wassilieff

Emboutissage, règles principales, cacul, exemples.

Dunod, 1953

G. Cotant

Technologie professionnelle du travail des métaux en feuilles.

Dunod, 1978

Le tube d'acier.

Soditube, 1986

P.B. Schubert et J. Bloc-Dumont

Cintrage des tubes.

Société de publications mécaniques, 1962

Guide pratique, métallerie, construction métallique.

Soditube, 1985

P. Corpet et G. Sénéchal

Guide pratique pour le cintrage des tubes.

Desforges, 1977

R. Forestier

Lexique de construction métallique et de résistance des matériaux.

OTUA, 1977

J. Triouleyre.

Procédé de formage.

Delegrave, Paris, 1980.

B. Wassilieff.

Travaux et outillage de la presse.

Dunod, Paris, 1956.

BOIS

G. Massobrio + P. Portoghesi
Casa Thonet
Editori Laterza, 1980

P. Garner
Twentieth century furniture
Phaidon, 1980

Technique et forme
Catalogue de LAC & S, 1985

VERRE

P. Dane
Guide pratique pour l'utilisation du verre
dans les ensembles mécaniques
Dunod, 1971

Documents techniques
Saint-Gobain

PLATRE

Bankart
Modern plasterwork design.
1928

W. Millar
Plastering, plain and decorative.
1927

F. Bardin
Le plâtre.
G.R.E.T., 1982

Le plâtre.
S.N.I.P., Eyrolles, 1982

H. Balbien.
Le staff
Eyrolles, 1954

PAPIER

T. & J.H. & L.S. Newman
Paper as Art and Craft
George Allen et Unwin Ltd, 1973

K. Londenberg
Papier und Form
Scherde, 1972

H. Micoud
Propriétés physiques des papiers
Imp. Eymond, 1933

A.G.H. Dietz
Paper and plastics in building

Le papier
in Traverse 27/28, 1983

T. Sundara Row
Geometric exercices in paper folding
Dover publications Inc., 1966

Ph. Saint Germain
Le papier
Editions France-Empire, 1962

G. Martin
Le papier
P.U.F. (coll. Que sais-je ?), 1976

G. Pochet
Tout l'emballage
Ed. d'organisation, 1967

M. Schuyt et U. Elffers
Origami
Chêne/Hachette, 1980

A. de Bécourt
Art de fabriquer toutes sortes d'ouvrages en papier
Audot, 1828

Plane geometry and fancy figures
The Cooper Union Museum, 1959

Plieuses et pliages,
Centre technique des industries graphiques.

BIBLIOGRAPHIE – STRUCTURES GONFLABLES.

Rapport du symposium international sur les structures pneumatiques,
Delf, Pays-Bas, 1972.

Frei Otto & Rudolf Trostel
Zugbeanspruchte Konstruktionen,
Ullstein, Frankfurt-Berlin, 1962.

C.V. Boys
Soap bubbles, their colours and the forces with mould them,
Dovers Publications, New-York, 1911.

A.D. Topping
Introduction to structural analysis of expandible structures,
Goodyear Aircraft Report, Ger 9870, U.S.A., 1960.

Roger N. Dent
Principles of pneumatic architecture,
The architectural Press, London, 1971.

Pneumatic building construction,
The academy of building and architecture,
Moscow, 1963.

C. Dollfus
Balloons,
Prentice-Hall, London, 1962.

Model study of a pneumatic formed sandwich shell,
Bulletin of the IASS n°43, 1970.

+

M. Salvadori & R. Heller
Structure et architecture
Eyrolles, Paris, 1976

L. Heuzey
Histoire du costume antique
Librairie ancienne H. Champion, Paris, 1922

La sculpture
Ministère des Affaires culturelles, Paris, 1981

4

VOILES FUNICULAIRES PLISSÉS

J.M. DELARUE / J.F. BROSSIN

LE COMPTE-RENDU DÉTAILLÉ DE CE DERNIER POINT A CONSTITUÉ LE RENDU DE LA SECONDE PHASE DE LA PRÉSENTE RECHERCHE - IL N'EST DONC PRÉSENTÉ À NOUVEAU QUE SOUS LA FORME DU RÉSUMÉ QUI A ÉTÉ PUBLIÉ DANS LES ACTES DU COLLOQUE "HABITAT ÉCONOMIQUE DANS LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT" ORGANISÉ EN 1983 PAR LES C.S.T.B, PLAN CONSTRUCTION ET E.N.P.C.

IL EST ACCOMPAGNÉ D'UNE NOTE RELATANT UN CAS D'APPLICATION OPERATIONNELLE -

J.M. DELARUE

J.F. BROSSIN

Unité Pédagogique d'Architecture n° 1, France.

Coques alvéolaires pour la construction économique.

Cet article relate une expérience d'auto-construction réalisée à l'Unité Pédagogique d'Architecture n° 1 afin d'éprouver un principe de structure en toile et plâtre adapté à la production de constructions économiques dans les Pays en Développement.

Ce principe constructif présente les principaux intérêts suivants :

- Technique utilisant des matériaux traditionnels économiques et locaux, convenant à plusieurs niveaux d'emplois : auto-construction par les usagers, construction par petites entreprises artisanales, préfabrication industrialisée par petites unités de production.
- Possibilité de réaliser une multiplicité de composants accomplissant divers rôles constructifs, en particulier des éléments franchisseurs pouvant constituer des toitures ventilées.

PRINCIPE STRUCTURAL

Des recherches sur les fondements de composition des formes structurales ont conduit à la mise au point d'un principe constructif original dénomé Voiles Funiculaires Plissés. Il s'agit de membranes plissées selon la forme naturelle d'équilibre des forces en présence, additionnant les effets structuraux de trois principes distincts :

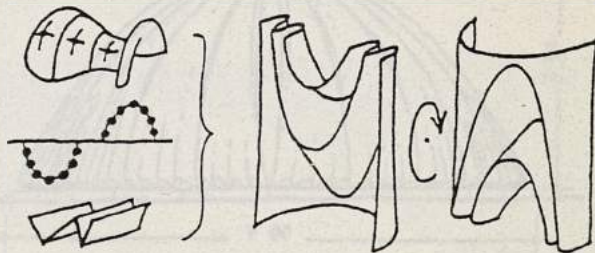
VOILES MINCES: Travail au long des surfaces et influence des distributions de courbure (positive, négative ou nulle),

FORME FUNICULAIRE: Auto-régulation selon un diagramme d'équilibre optimal de traction excluant les contraintes de flexion. Réversibilité de l'état d'équilibre de stable en instable.

PLIAGE: Élémentarité de mise en forme assurant inertie, anisotropie, multidimensionnalité.

La conjugaison de ces données permet la composition d'éléments qui se fabriquent spontanément selon la forme de résistance idéale en état de traction par suspension et qui travaillent ensuite correctement en compression après

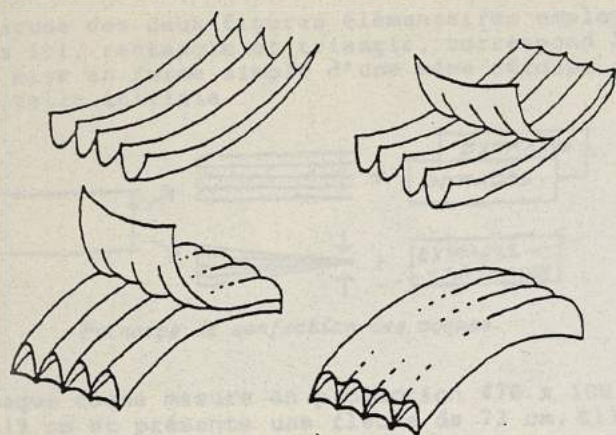
retournement tout en présentant une résistance à la flexion satisfaisante.



Principe de composition des Voiles Funiculaires Plissés.

On peut améliorer considérablement les performances de ce type de construction en réalisant des coques alvéolaires à parois multiples; celles-ci sont constituées de plusieurs nappes funiculaires superposées qui aménagent des cavités tubulaires intercalaires.

La conformation en coque alvéolaire à triple paroi permet de répondre simultanément à des impératifs de résistance et d'isolation. Elles sont fabriquées en trois phases consécutives conformément aux schéma ci-après.



Constitution des coques alvéolaires à triple paroi.

MATERIAUX CONSTITUTIFS

Le mode de fabrication des coques expérimentées ici consiste à utiliser de la toile de jute imprégnée de plâtre (technique du staff) en exploitant au mieux les propriétés complémentaires des matériaux à des fins structurales, traction pour la toile, compression pour le plâtre. (Chacun de ces matériaux, assez économique, est déjà produit en divers pays en développement).

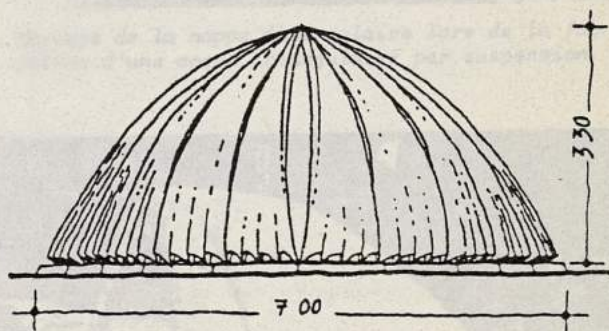
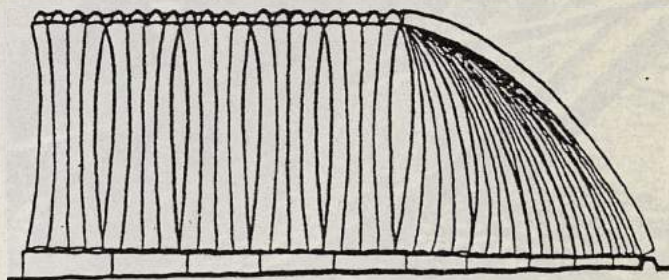
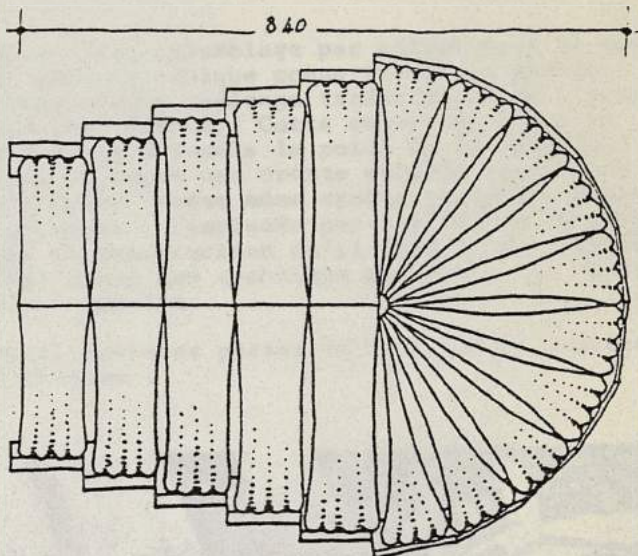
. Le plâtre utilisé pour cette construction est un plâtre à haute performance (semi hydrate α) qui travaillent de 450 à 500 kg/cm² en compression moyennant un gachage eau/plâtre/retardateur de prise dosé avec précision. Il est possible d'employer un plâtre moins performant travaillant à 200 kg/cm² (mélange α β) ou des phosphoplâtres sans résidus qui permettent une mise en œuvre correcte.

. La fibre naturelle utilisée comme support est de la toile ordinaire d'emballage de faible densité qui permet une imprégnation totale de plâtre après préparation de la toile par humidification. Les métrages utilisés ici sont les dimensions standard du commerce (rouleaux de 140 et 190 débités en laizes de 5 m de longueur).

Il faut globalement prévoir la même quantité d'eau que de plâtre. L'eau salée, qui accélère la prise, peut être utilisée moyennant l'apport compensateur d'un retardateur de prise. Chaque composition toile/plâtre/eau doit être soigneusement testée avant usage définitif. Ces opérations doivent impérativement être effectuées à l'abri du soleil.

CONSTRUCTION DE L'EDIFICE

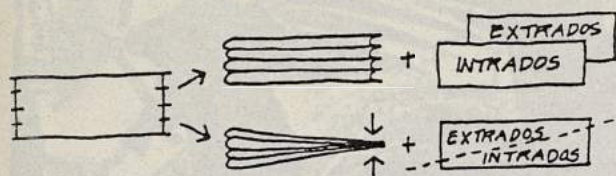
La construction expérimentale présentée ici est un prototype destiné à apprécier les performances des Voiles Funiculaires Plissés constitués en coque alvéolaire à triple paroi.



Plan de masse, coupe longitudinale et façade postérieure de l'édifice.

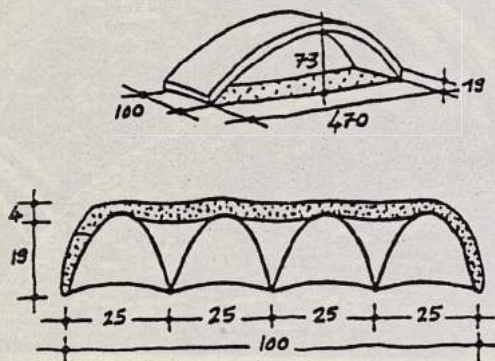
La forme générale de l'édifice est dictée par la configuration trapézoïdale du lieu d'implantation. Le principe de composition modulaire adopté témoigne de la possibilité de répondre à des exigences de production en série. L'édifice est constitué d'arches cylindriques dont la disposition en arc-boutant permet d'augmenter la portée.

Chacune des deux figures élémentaires employées ici, rectangle et triangle, correspond à la mise en forme simple d'une même découpe de toile initiale.



Principe de confection des coques.

Chaque coque mesure en projection 470 x 100 x 19 cm et présente une flèche de 73 cm. Elles pèsent à sec 80 kg (élément triangulaire) et 120 kg (élément rectangulaire), ce qui autorise aisément la manipulation à bras d'homme par deux personnes. Leur courbure longitudinale est assimilable à une portion d'arc de cercle.



Dimensions et coupe transversale d'une coque rectangulaire.

Les ajustements de longueur avant l'assemblage s'obtiennent par découpe à la scie égoïne. La concavité latérale de chaque coque aménage des ouvertures qui servent ici de baie (cette courbure latérale peut être supprimée à la fabrication afin d'obtenir des coques jointives. Les baies sont alors réalisées par percement des coques).

Les coques n'ont pas été employées dans la position rigoureusement inverse de celle de fabrication afin de prouver leur relative souplesse d'emplois moyennant une légère dérogation à la logique structurale absolue.

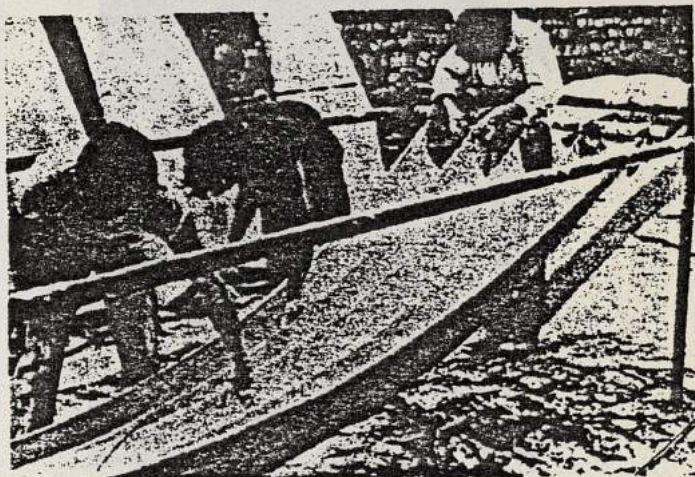
Deux techniques de fabrication des coques ont été confrontées, suspension et moulage.

La fabrication par suspension est la modalité la plus immédiate, qui demeure réalisable en tout lieu avec un minimum d'équipement. Elle permet de nombreuses variations de forme et ajustements sur le tas. Elle convient pour la production en petit nombre.

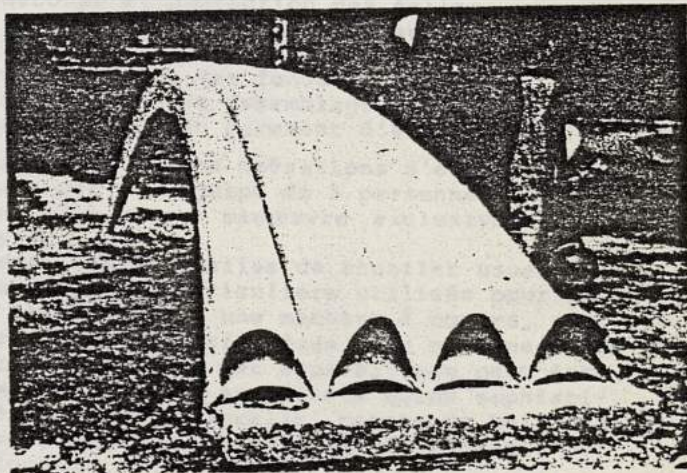
La fabrication par moulage permet d'assurer une reproduction rigoureuse des formes. Elle supprime toute opération de confection préalable et autorise une cadence de production plus élevée; c'est une voie de fabrication propice à l'industrialisation.

Après leur assemblage par polochonage et bande plâtrée, chaque coque reçoit un parement d'étanchéité (mélange traditionnel de chaux, sable et plâtre). Cette couche de 2 à 4 cm d'épaisseur double le poids de la construction et forme une croûte externe résistante aux chocs. Cette même croûte peut être avantageusement remplacée par une couche de plâtre de construction qu'il faut alors étanchéifier selon une technique convenant aux conditions locales.

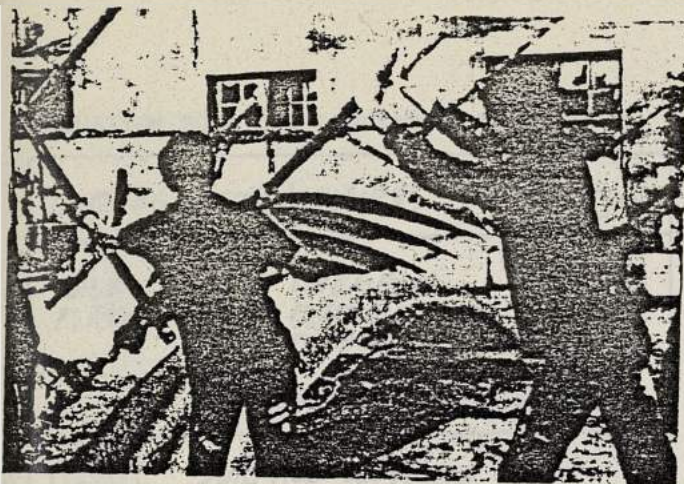
Voici quelques phases de réalisation caractéristiques :



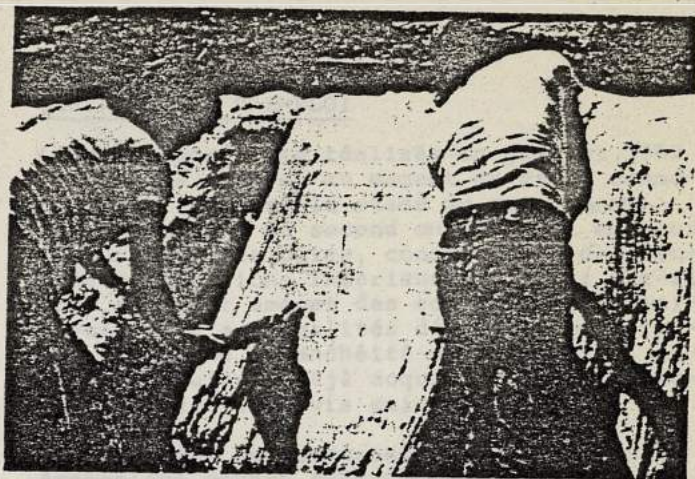
Réglage de la nappe intercalaire lors de la fabrication d'une coque triangulaire par suspension.



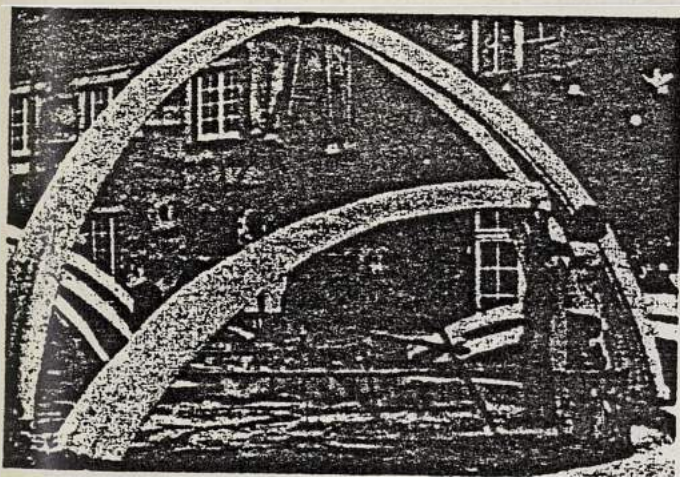
Coque triangulaire retournée avant la disposition de la nappe d'extrados.



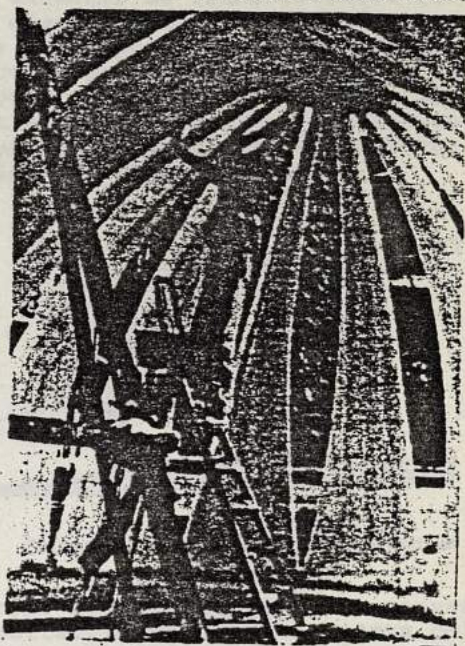
Démoulage d'une coque rectangulaire.



Lissage du parement d'étanchéité.



Mise en place des coques d bras d'homme avant l'assemblage.



Nature de l'espace intérieur engendré.



Vue extérieure de l'édifice avant application du parement d'étanchéité.

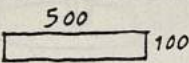
La réalisation du gros œuvre comporte les étapes suivantes :

- . découpe et confection des toiles
- . fabrication du châssis de suspension et du moule
- . construction des fondations
- . fabrication et assemblage des coques
- . application du parement d'étanchéité

L'ensemble de ces opérations s'effectue en 8 jours par une équipe de 5 personnes non spécialisées et par manœuvre exclusivement manuelle.

Hormis les ustensiles de chantier usuels, les seuls outils particuliers utilisés pour gain de temps ont été une machine à coudre, quelques tubes d'échaffaudage, une machine à projeter le plâtre. Cet appareillage peut être remplacé par des expédients moins sophistiqués : couture manuelle, perche de bois ligaturée, application manuelle de l'enduit par talochage.

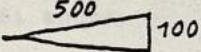
EVALUATION POUR UNE COUVERTURE DE 50 m²

COQUES RECTANGULAIRES 

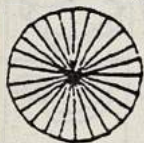
TOILE 15 M LINEAIRES 150 F TTC
 PLATRE 80 KG PLATRAGE TOILE. 60 F TTC
 100 KG PLATRAGE EXT. 100 F TTC
 COUT UNITAIRE 310 F TTC



SURFACE COUVERTE
 48 M² 12 COQUES. 3 720 F TTC
 PRIX DU METRE
 CARRE COUVERT... 77,50 F TTC

COQUES TRIANGULAIRES 

TOILE 10 M LINEAIRES ---- 100 F TTC
 PLATRE 80 KG PLATRAGE TOILE. 60 F TTC
 50 KG PLATRAGE EXT... 50 F TTC
 COUT UNITAIRE ---- 210 F TTC



SURFACE COUVERTE
 50 M² 25 COQUES - 5 250 F TTC
 PRIX DU METRE
 CARRE COUVERT --- 105 F TTC

Coût des matériaux, main-d'oeuvre non comprise (barème 1982).

COQUES RECTANGULAIRES

FABRICATION DU MOULE 8 H x 5 PERS
 FABRICATION DES COQUES 70 H x 5 PERS
 ASSEMBLAGE DES COQUES 16 H x 5 PERS
 PLATRAGE EXTERNE 18 H x 5 PERS

210 H = 5 JOURNEES x 5 PERSONNES

COQUES TRIANGULAIRES

CONFECTION DES TOILES 20 H x 2 PERS
 PLATRAGE DES TOILES 32 H x 3 PERS
 ASSEMBLAGE DES COQUES 16 H x 5 PERS
 PLATRAGE EXTERNE 8 H x 5 PERS

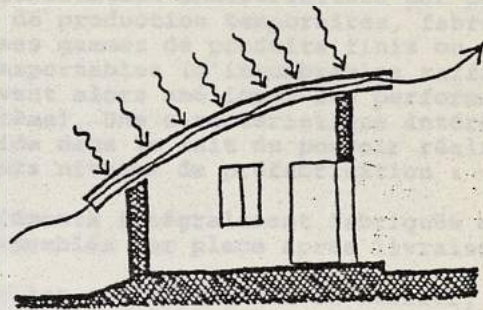
256 H = 6 JOURNEES x 5 PERSONNES

Durée de réalisation pour une surface de 50 m².

PERSPECTIVES D'EMPLOI

L'expérience a été réalisée en juillet 1982 et n'a pas encore, au moment de cette communication, dépassé le stade du gros œuvre. Les opérations de second œuvre sont en cours (obturation des baies, construction de l'entrée et finitions intérieures). Aussi est-il trop tôt pour amener des conclusions définitives quant aux qualités d'isolation thermique, phonique, étanchéité et durabilité. Au vu des résultats déjà acquis, on peut toutefois émettre les avis suivants :

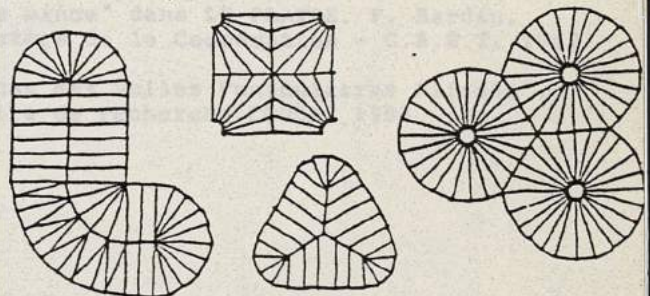
Les systèmes de couverture pour l'habitat économique posent fréquemment problème car les éléments de franchissement sont rares, (et d'autant plus rares les solutions en plâtre). La réponse qu'amène ce type de construction présente de surcroît l'avantage de pouvoir réaliser des parois ou des toitures naturellement ventilées par convection (fraîcheur diurne ou chauffage nocturne par restitution d'énergie accumulée).



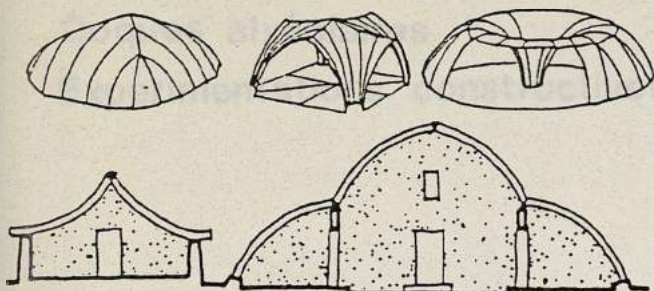
Toiture ventilée avec protection du mur.

Ce type de construction peut convenir à de l'habitat, de menus équipements collectifs (on obtient aisément 100 m² avec 8 m de portée sans point d'appui intermédiaire) ainsi qu'à des bâtiments à usage industriel ou agricole. Il se prête à des constructions définitives ainsi que provisoire du type habitat d'urgence.

En transposant la composition de la construction présentée ici, on peut envisager plusieurs types d'édifice basés sur la combinatoire modulaire issue de ces mêmes coques rectangulaires et triangulaires.

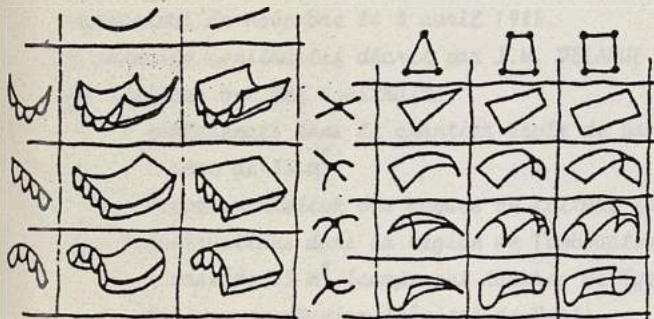


Quelques principes d'assemblage.



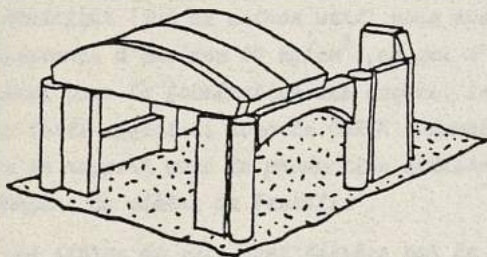
Quelques principes d'assemblage.

De simples variations des nombreux paramètres qui définissent les formes ou proportions des éléments sont possibles, sans modifier le principe de composition structurale. On peut ainsi accéder à une plus grande variété de formes, à une souplesse d'emploi encore supérieure.



Principales catégories de variation.

On parvient de la sorte à toute une diversité d'éléments qui peuvent accomplir l'intégralité des fonctions constructives (porteurs, franchisseurs, enveloppes, remplissages) et qui peuvent constituer des gammes complètes et cohérentes de composants complémentaires à un comportement homogène.



Exemple de vocabulaire constructif.

Au-delà de ses performances strictement techniques, ce principe constructif s'avère intéressant par la qualité plastique des formes et

espaces qu'il engendre. Ceci tient à la manifestation lisible d'une vérité structurale clairement exprimée. Ce retour obligé à une étymologie des formes structurales universelles produit un vocabulaire formel culturellement intégré, assorti de fortes connotations symboliques (coupoles, arcs, colonnes, etc...).

Les conditions de réalisation de cette expérience - équipement minimal, personnel non qualifié, matériaux courants - ont prouvé que cette technique était praticable par tout un chacun, selon un mode d'auto-construction sur le tas, exécuté directement par les usagers (moyennant un minimum d'instructions). Cette technique peut donc aussi être employée par des entreprises de construction artisanales ou des tacherons locaux. L'usage d'un léger équipement de chantier usuel améliore dès lors considérablement la qualité de finition et le rendement de production; des instruments de levage permettent d'atteindre des dimensions supérieures.

A fortiori la technique des Voiles Funiculaires Plissés peut correspondre à un système de préfabrication industrialisée par petites unités de production temporaires, fabriquant diverses gammes de produits finis ou semi finis transportables (d'innombrables raffinements peuvent alors améliorer les performances du système). Une caractéristique intéressante réside dans le fait de pouvoir réaliser plusieurs niveaux de préfabrication :

- éléments intégralement fabriqués en usine, assemblés sur place après livraison;
- toiles confectionnées en atelier, livrées en "kit" prêtes à l'emploi sur l'emplacement même de la construction.

Un projet répondant aux conditions économiques, techniques et climatiques d'Afrique tropicale est en cours d'étude.

Cette expérience a été entreprise avec le concours d'un contrat de recherche CORDA.

Articles des auteurs de la présente communication traitant du même sujet :

- "Folded structures" dans IL 27 (Naturel building), 1980.
- "Emplois du plâtre pour les structures en voile mince" dans LE PLATRE. F. Bardin, Ministère de la Coopération - G.R.E.T. 1982.
- "Le cas des Voiles Funiculaires Plissés". Mémoire de recherche CORDA, 1983.

Coques alvéolaires

Expérimentations constructives au MALI.

Dans le cadre de notre travail de 3^{ème} cycle, à la suite des expériences menées à l'Unité Pédagogique d'Architecture n°1, nous avons été amenés à réaliser plusieurs expérimentations constructives au MALI. Dans une première phase, grâce à l'appui du GRET et du CTA (centre de technologie adaptée) de Bamako, une étude du plâtre local et un prototype ont été réalisés de janvier à juillet 1984. Une seconde phase, dans le cadre d'un programme d'urgence de l'UNICEF, a permis la réalisation de plusieurs constructions dans le nord du pays (cercle de Diré, région de Tombouctou) de novembre 84 à avril 1985.

Le principe constructif décrit par J.M. DELARUE et J.F. BROSSIN était commun à toutes les réalisations.

Six édifices ont été construits:

- 2 expériences dans le chantier école de Bamako (Sogoniko)
 - . 1 case de 35 m²
 - . 1 expérimentation des coques en toiture funiculaire
- 4 constructions dans la région de Tombouctou
 - . 1 case de 55 m² (campement touareg de Tchenkour)
 - . 2 lieux de réunion (hôpital de Diré)
 - . 1 mise en oeuvre en toiture (pharmacie de l'hôpital)

MATERIAUX UTILISES COMMUNS AUX 6 EDIFICES

. Le plâtre utilisé pour ces constructions est un plâtre artisanal produit au Mali dans le nord du pays (TESSALIT). Sa résistance à la compression, moyennant un gâchage dosé précisément, était de l'ordre de 120 kg/cm² sans utilisation de retardateur. Avec l'adjonction de retardateur (jus de citron vert) nous avons obtenu une résistance d'environ 80 kg/cm², ce qui s'est avéré suffisant pour la fabrication des coques. Les résultats de ces tests effectués avec le CNREX à Bamako sont à mettre en rapport avec la production artisanale et peu homogène du plâtre de Tessalit.

. Les fibres de jute sont tissées par la Société Malienne de Sacherie (SOMASAC) qui commercialise une toile de 70 cm de largeur, ce qui a nécessité la couture des laizes entre elles.

. Les fibres nécessaires au polochonage sont des fibres de sisal disponibles sur les marchés locaux.

CHANTIER ECOLE DE SOGONIKO-BAMAKO

La forme générale de l'édifice a permis la mise au point de plusieurs problèmes, en particulier:

- Assemblage jointif des éléments
- Mise en oeuvre de coques en "corolle"
- Traitement des ouvertures



Les éléments de projection rectangulaire ont été obtenus par moulage, les coques triangulaires ont été fabriquées par suspension.

Après assemblage des coques, la construction a reçu un enduit taloché à base de plâtre, chaux et sable.

Des éléments rectangulaires mis en toiture sur une case en banco ont permis de tester différents enduits.

EXPERIMENTATIONS REGION DE TOMBOUCTOU

Il s'agissait ici d'adapter la technique des CATP aux conditions climatiques, économiques et techniques de la région présentant par ailleurs de nombreux atouts en faveur de ce transfert de technologie:

- pluviométrie très faible
- proximité du lieu de production du plâtre → coût de transport réduit
- utilisation traditionnelle de textiles dans la construction
- répertoire de formes engendrées par la technique constructive proche de l'habitus des Touaregs
- nécessité de proposer dans cette région semi-désertique des constructions simples sans utilisation de bois.

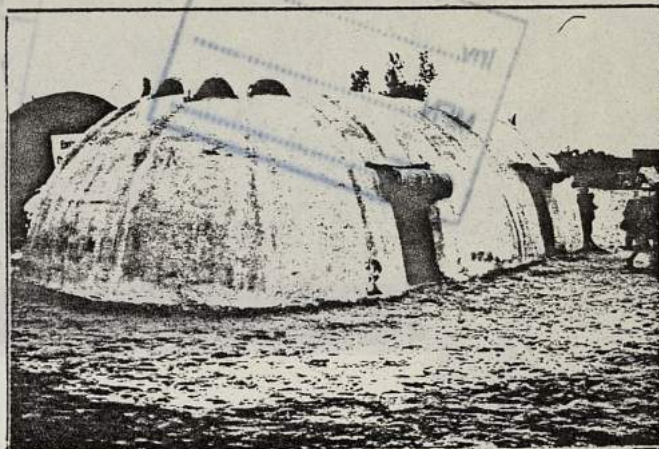


salle communautaire de Tyenkour; vue Sud

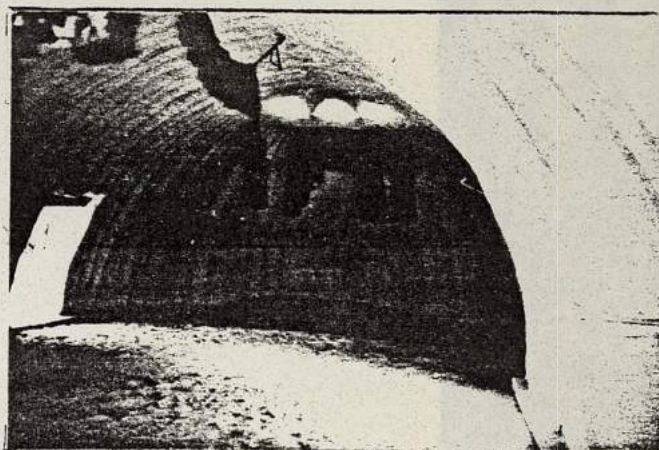
Toutes les coques ont été fabriquées par moulage afin de permettre la répliquabilité de l'opération. L'enduit protecteur est composé d'un mélange de plâtre et de sable.



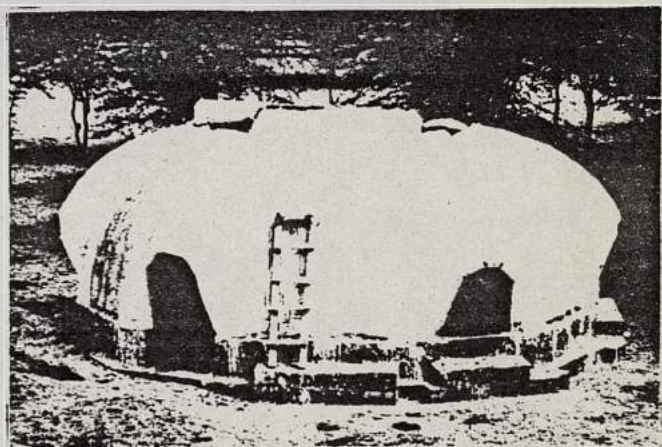
types de coques utilisées



Tyenkour; vue Nord



espace intérieur



salle de réunion; Hôpital de Diré

