

UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

PATHOLOGIE DES CONSTRUCTIONS

GCL 566

Responsable: Dr. GHOMARI Fouad

Chap. 5. PATHOLOGIE DU BETON ARME.

5.1. Introduction.

Le béton armé, matériau de construction par excellence, a bénéficié de nombreuses études et de multiples expérimentations si bien que divers règlements se sont succédés de 1927 jusqu'à nos jours : circulaire de 1927 puis de 1934 ; B.A. 45, B.A. 60, CCBA 68, BAEL 80, BAEL 91, Eurocode.

Pourquoi alors se produit-il encore des sinistres ?

Il y a d'abord les sinistres dus à des causes exogènes au Béton armé comme le tassement des fondations, protection insuffisante des revêtements, etc.,

Pour les autres, il peut s'agir de cas fortuits comme dans tous les secteurs de l'activité humaine ou parfois même de cas de malveillance dus à un manque de compétence et/ou de conscience.

Henri Lessier disait en 1951 *''A la base de chaque erreur, on découvre en général une faute élémentaire de bon sens''*. Aussi l'expertise d'un sinistre montre très souvent que c'est la synergie de plusieurs facteurs qui en est la cause et il n'est pas facile d'identifier la principale.

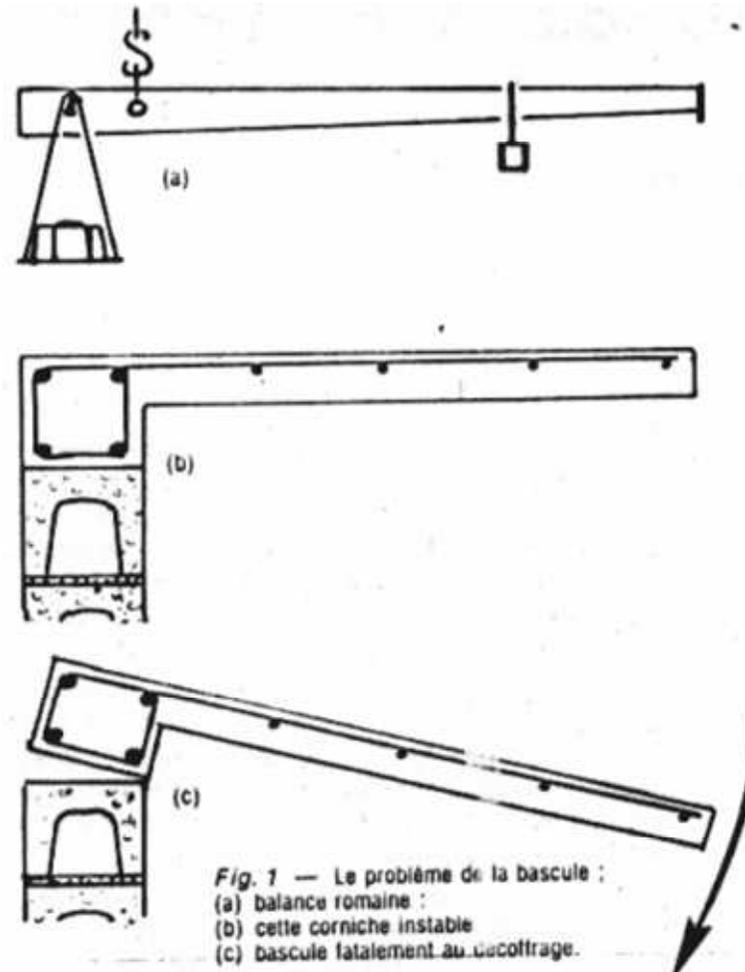
5.2. Erreurs de conception.

i., instabilité statique:

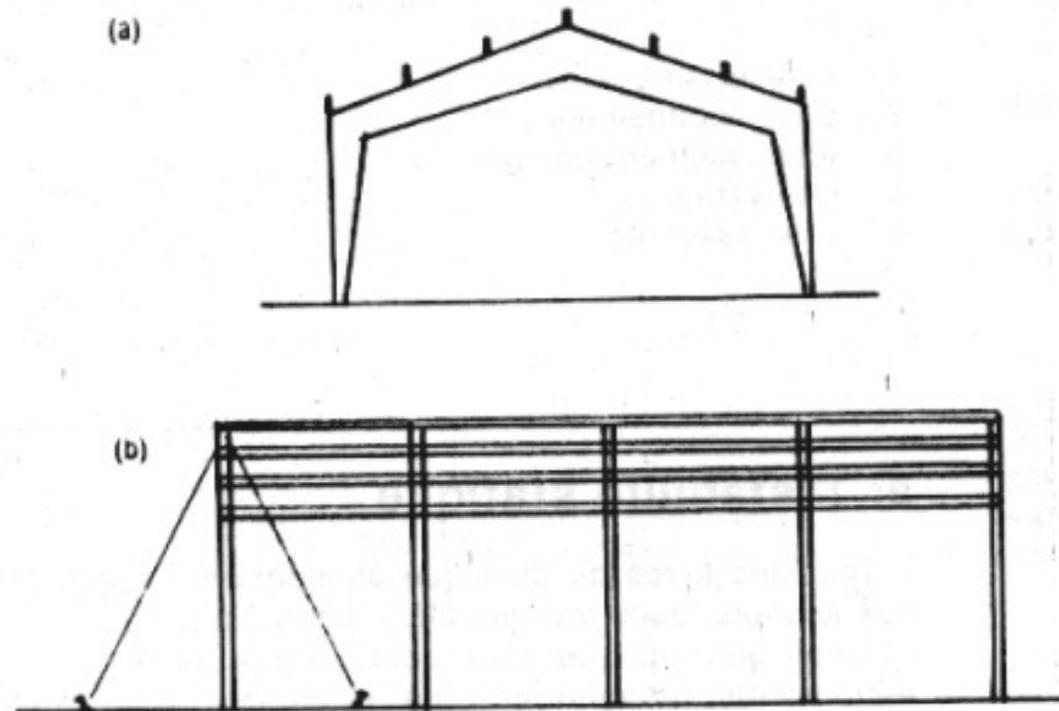
La notion d'équilibre statique est illustrée par la stabilité de deux plateaux d'une balance impliquant deux poids égaux.

En revanche, la balance romaine introduit la notion de bras de levier qui a autant d'influence que le poids ; là on s'intéresse plutôt au moment.

Ceci dit il n'est pas concevable de construire une corniche comme celle présentée par la car cette réalisation est instable et ne peut que s'effondrer au décoffrage en basculant autour de son arête.



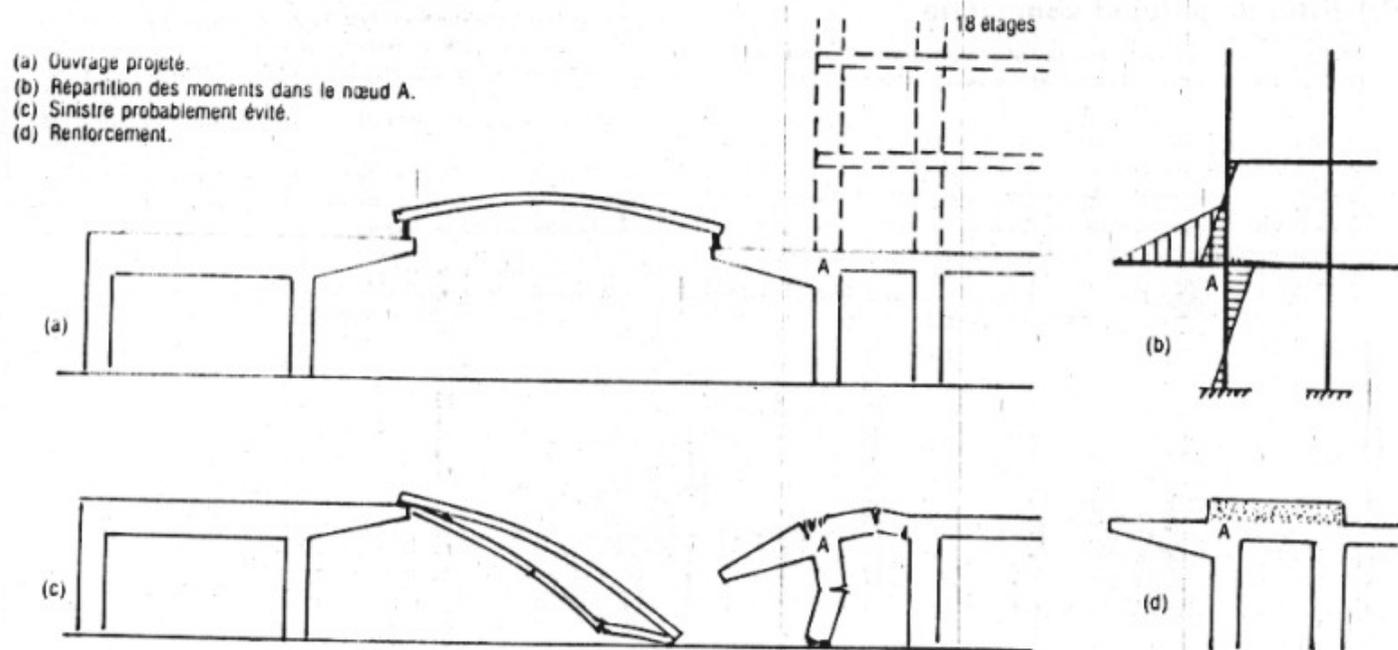
Aussi, parfois l'instabilité est précaire en cours de construction. L'exemple montre cet effet dû à une insuffisance de contreventement des portiques avant le scellement des pieds.



Portiques insuffisamment contreventés avant scellement des pieds si les haubans sont mal tendus et les pannes simplement posées.

Exemple 1 :

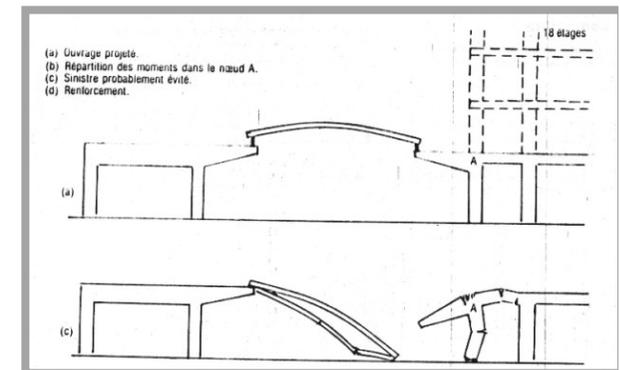
une remise en cause de dernière minute de la stabilité d'un bâtiment d'habitation, en cours de construction, prévient d'un effondrement assuré. La couverture d'un vaste hall comportait dans sa partie centrale une alternance de grands bacs en béton précontraint de 12 m de long et de voûtes translucides et sur ses côtés une dalle en béton. L'ensemble était porté de chaque côté par de grandes consoles de 5.40 m en porte à faux, reliés à deux bâtiments culassés. L'un de ces bâtiments était à simple RDC et sa stabilité avait été correctement assurée. L'autre bâtiment était un immeuble de 18 étages sur RDC.



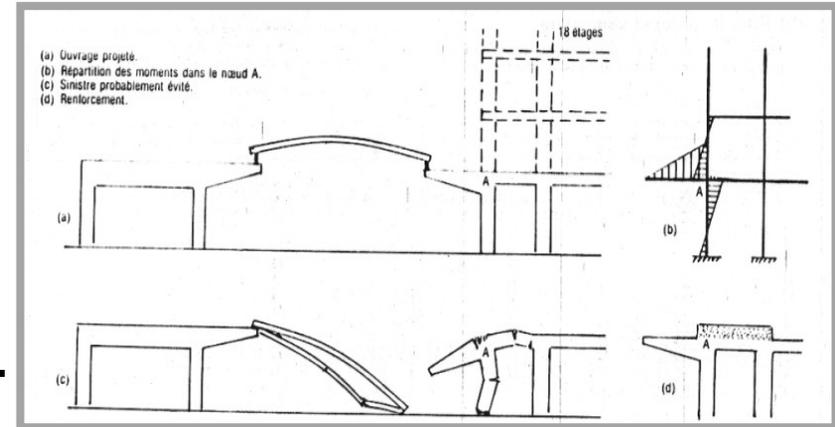
Les deux RDC étaient réalisés, ainsi que les consoles et dalles latérales du hall, quand le maître de l'ouvrage demande que la toiture du hall soit immédiatement achevée, avec grands bacs et voûtes translucides, de manière à pouvoir l'occuper et y exercer son commerce. L'architecte donna son accord de principe. Ce fut le bureau de contrôle qui attira l'attention sur le fait que l'ouvrage ainsi réalisé n'aurait pas été stable.

Causes : en effet, les consoles côté bâtiment étaient encastrées dans des nœuds comportant :
Une poutre de plancher prolongeant la console,

Un poteau constitué de ses tronçons de RDC et de 1er étage de section confortable en raison des 18 étages à porter.



Le moment de flexion important, apporté par chaque console, devait être repris, à raison de 45% dans chaque tronçon de poteau et 10% seulement par la poutre de plancher.



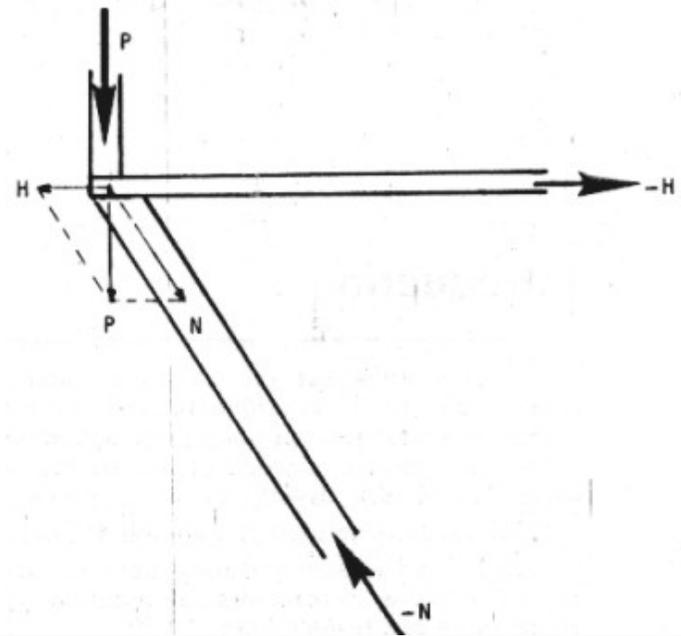
En l'absence du tronçon supérieur du poteau du 1er étage et de sa charge, le moment dans le tronçon inférieur était majoré de 50% et celui dans la poutre était triplé. Or, les sections de béton et d'armatures n'étaient pas prévues pour cela, et l'on pouvait prédire, sans grand risque de se tromper, une ruine certaine de la structure porteuse de la couverture et la couverture elle-même.

Remèdes : la poutre de plancher fut renforcée en dénudant les aciers supérieurs, par repiquage, en disposant des cadres en prolongeant vers le haut les cadres existants et en y plaçant de grosses barres de moment négatif. Ensuite on enduisit la surface de reprise d'un mortier de résine d'accrochage et on bétonna la surélévation de la poutre.

Moralité : les changements dans un projet en cours de réalisation sont souvent source de graves problèmes par suite d'oublis ou de négligence.

Un poteau est une barre qui transmet un effort suivant sa direction. S'il est incliné, il transmet un effort incliné qui comporte par conséquent une composante horizontale

En statique, l'équilibre est obtenu en équilibrant un effort par un autre effort égal et opposé. C'est évident et parfois c'est oublié, tellement on a l'habitude de voir les poteaux transmettre individuellement leurs charges aux fondations.

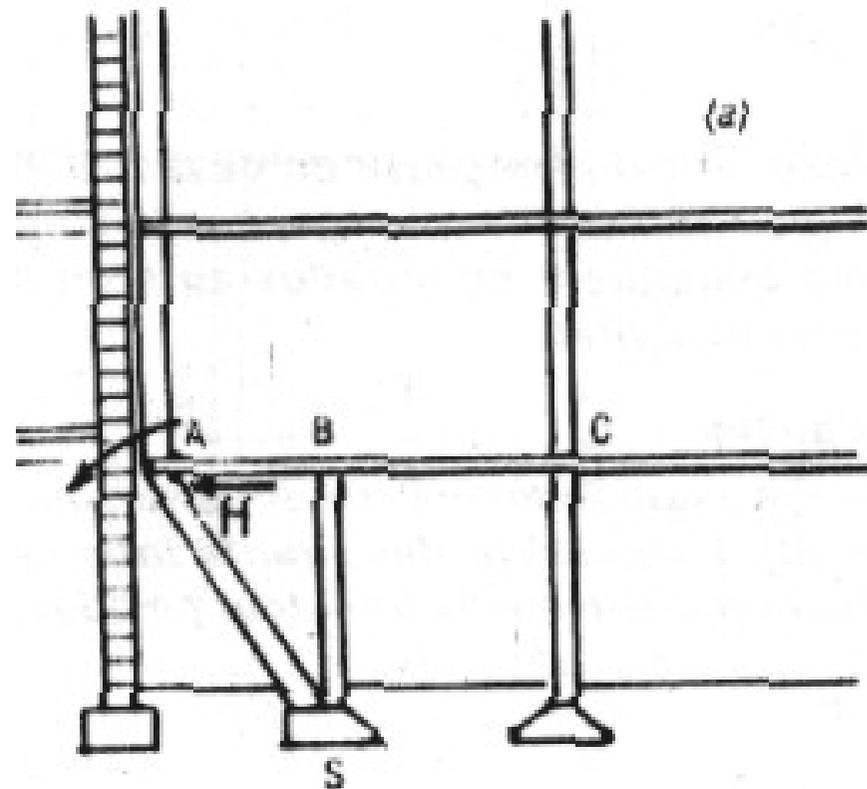


Dans cet élément de construction la charge P se décompose en charge N et un effort horizontal H , qui doivent être équilibrés par 2 réactions $-N$ et $-H$. Le reste de la construction est-il capable de résister à $-H$?

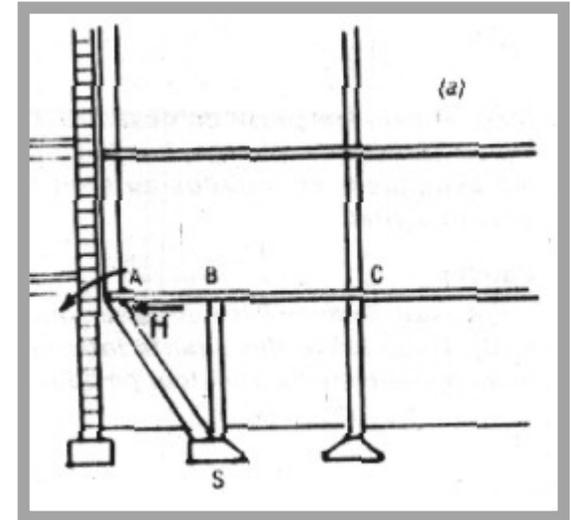
Exemple 2 : un bâtiment se fissure. Des renforcements onéreux, préviennent à temps l'effondrement.

Les problèmes de mitoyenneté, quand il s'agit d'apposer, sur sol médiocre, un bâtiment nouveau sur un ancien sans y provoquer de désordre sous l'effet de nouveaux tassements, conduisent à des solutions originales, tantôt bonnes et tantôt mauvaises.

Dans cet exemple, le projeteur avait eu l'idée d'incliner en sous-sol les poteaux porteurs du mur de doublage en file A pour qu'ils rejoignent les semelles de la file voisine. Comme par ailleurs, les façades devaient être traitées en 'murs rideaux', les planchers portaient uniquement sur les refends, en commençant par les murs de doublage en mitoyenneté.



Les travaux étaient arrivés au plancher haut du 1er étage quand le chef de chantier, qui faisait consciemment, tous les matins, le tour de ses installations, observa que le joint de tassement réservé entre l'ancien bâtiment et le nouveau n'avait plus une épaisseur régulière.



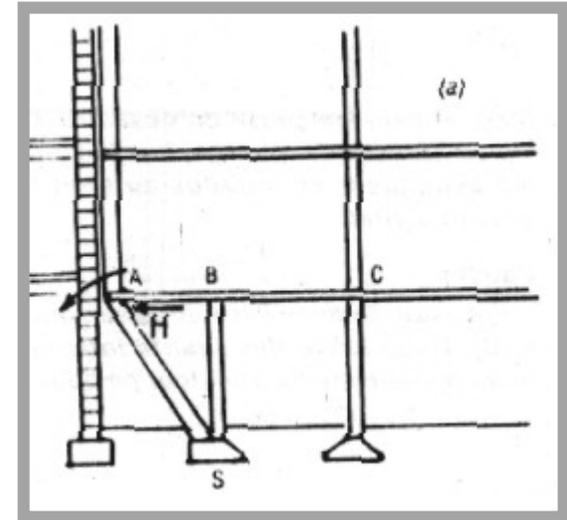
Au niveau du plancher haut du sous-sol, le polystyrène qui avait servi de coffrage était à moitié écrasé. Le chef de chantier alerta son entreprise, et l'examen attentif des lieux qui s'en suivit révéla les désordres suivants :

Les triangles formés par les poteaux inclinés, les poteaux verticaux adjacents et la travée de plancher intermédiaire étaient entrain de basculer vers la bâtiment ancien,

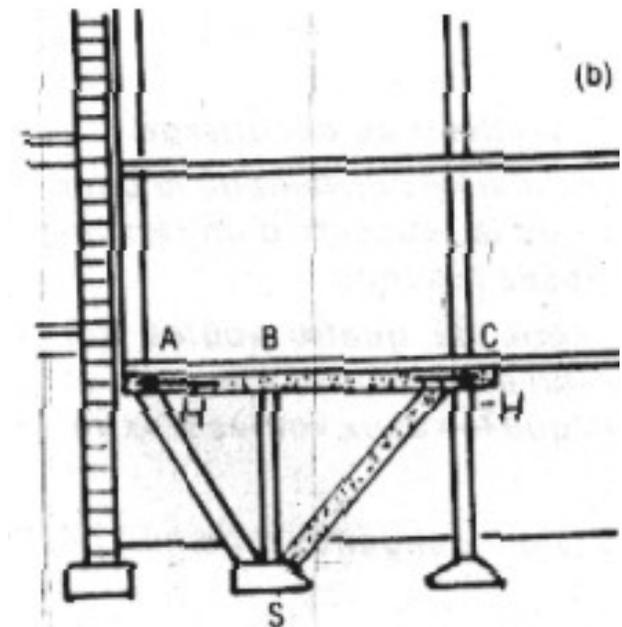
Un bon nettoyage révéla des fissures sur la face supérieure du plancher haut de sous-sol au dessus des poteaux de la file B et d'autres transversales dans tous les poteaux du sous-sol.

La présence du bâtiment ancien qui contrebutait avait empêché un effondrement certain.

Causes : la composante horizontale H de l'effort dans les poteaux inclinés ne pouvait être reprise dans la structure du sous-sol du bâtiment nouveau, peut être avait-elle même provoqué un léger glissement des semelles S .



Remèdes : il fallait réaliser une structure capable, soit de supprimer la poussée H , soit de l'équilibrer par une butée égale et opposée. Pour cette dernière, il fallait réaliser des diagonales SC mises en charge par vérin et des tirants AC . Le maître de l'ouvrage ne fut pas satisfait puisque ces adjonctions devaient supprimer quelques places de parking au sous-sol. Néanmoins il n'usa pas de son droit de faire démolir.



Moralité : quand il s'agit de barres non orthogonales, il est utile de se rappeler le principe du parallélogramme des forces.

ii., méconnaissance des efforts:

Il y a parfois des raisonnements issus de théories erronées tel que celui-ci : une table sur deux pieds inclinés tient parfaitement d'aplomb. On le voit bien en tenant une règle entre deux doigts. Si l'on incline le tout, il doit bien sûr tenir encore et nous avons obtenu un poteau vertical. L'association de cette partie avec sa symétrie, nous aurons l'image d'un portique. Le plus comique c'est que des personnes convaincus sont passés à la réalisation, ce qui a conduit nécessairement à la ruine.

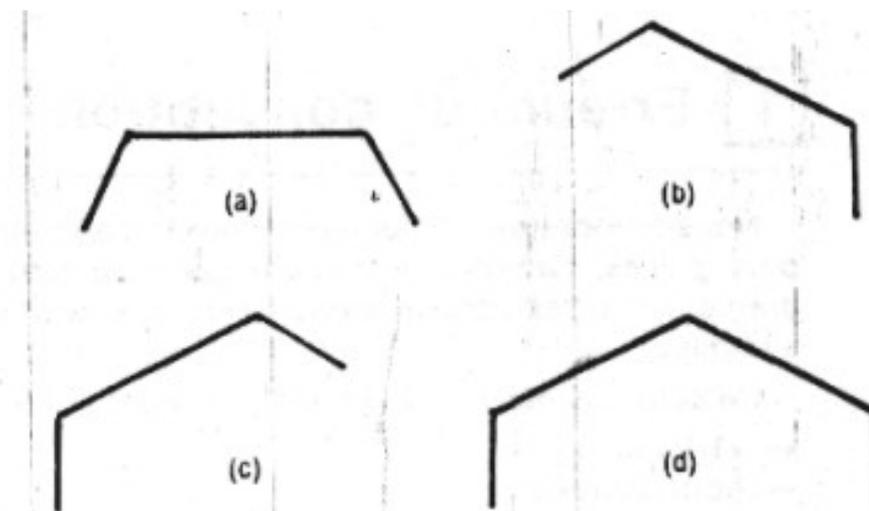
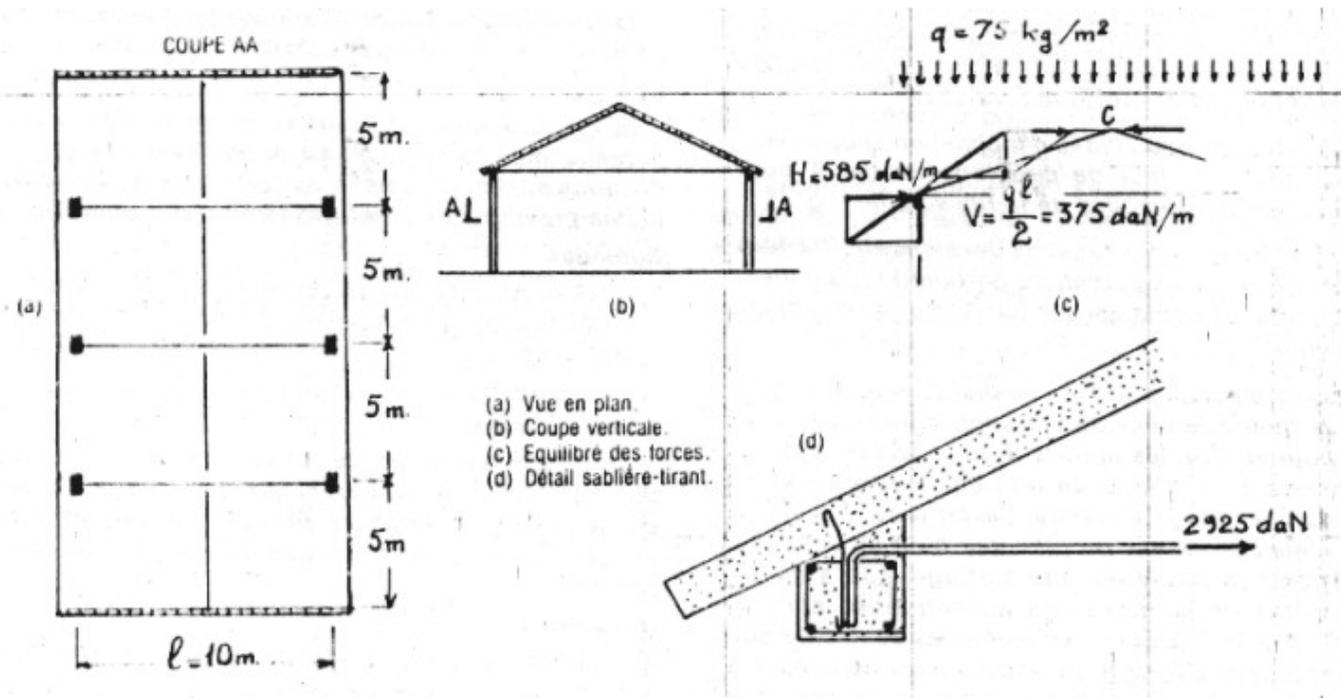


Fig. 4 — De l'art de démontrer qu'un arc ne pousse pas.

Exemple 3 : un hangar agricole s'effondre au décoffrage. Un mort et sept blessés..

Chacun des deux versants symétriques était constitué de poutrelles en céramique armé, formant plancher incliné sur lequel devait être posée

une toiture en tuiles canal. Un simple chaînage formait faîtage. Le tout reposait sur deux files de poteaux et deux pignons en briques creuses. L'ouvrage couvrait ainsi un rectangle de 20x10 m. Les tirants formés d'un diamètre de 25 mm étaient nettement insuffisants pour reprendre les poussées. De plus, il était fort mal ancré. L'effondrement survint pendant que l'on enlevait les étais qui soutenaient le faîtage.

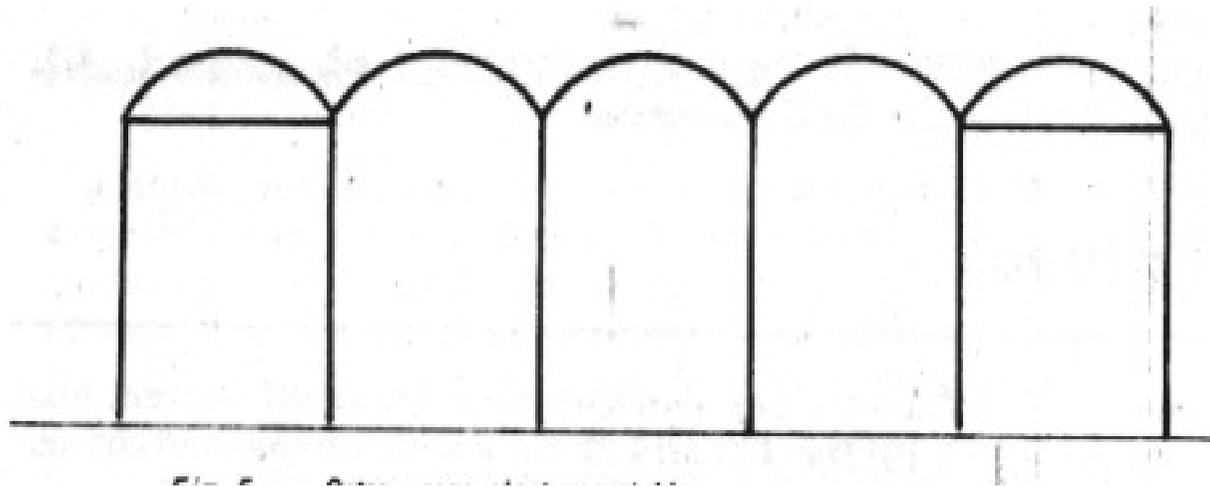


Causes : le hangar avait été construit dans la méconnaissance totale des règles de l'équilibre statique. Estimons à $q = 75 \text{ kg/m}^2$ la masse de la sous toiture ainsi réalisée, constituée de deux plaques pratiquement articulées en faîtage et en sablière ; de portée totale $l = 10 \text{ m}$ et de flèche $f = 1.60 \text{ m}$ et écrivons l'équilibre des forces de gauche par rapport au faîtage C où la réaction est horizontale par raison de symétrie.

La stabilité de chaque versant, implique en sablière une réaction verticale $V = ql/2$ avec $V = 75 \times 10/2 = 375 \text{ daN/m}$ et deux réactions horizontales antagonistes, l'une en faîtage et l'autre en sablière, de $H = ql^2 / 8f = 75 \times 100 / 8 \times 1,60 = 585 \text{ daN/m}$. Dans les voûtes correctement réalisées, cette poussée est reprise par une poutre noyée dans la voûte et reportée ainsi aux tirants. A supposer que la céramique armée ait pu, par effet de voûte, reporter ces efforts sur 5 m de chaque côté, c'est $585 \times 5 = 2925 \text{ daN}$ que devait reprendre chaque tirant. Or, la transmission des efforts n'y était pratiquement pas assurée. Et il restait encore à poser les tuiles, d'un type assez lourd. En outre, l'ouvrage devait encore pouvoir résister à la neige et au vent.¹⁵

Moralité : inventer un nouveau type de construction est toujours hasardeux.

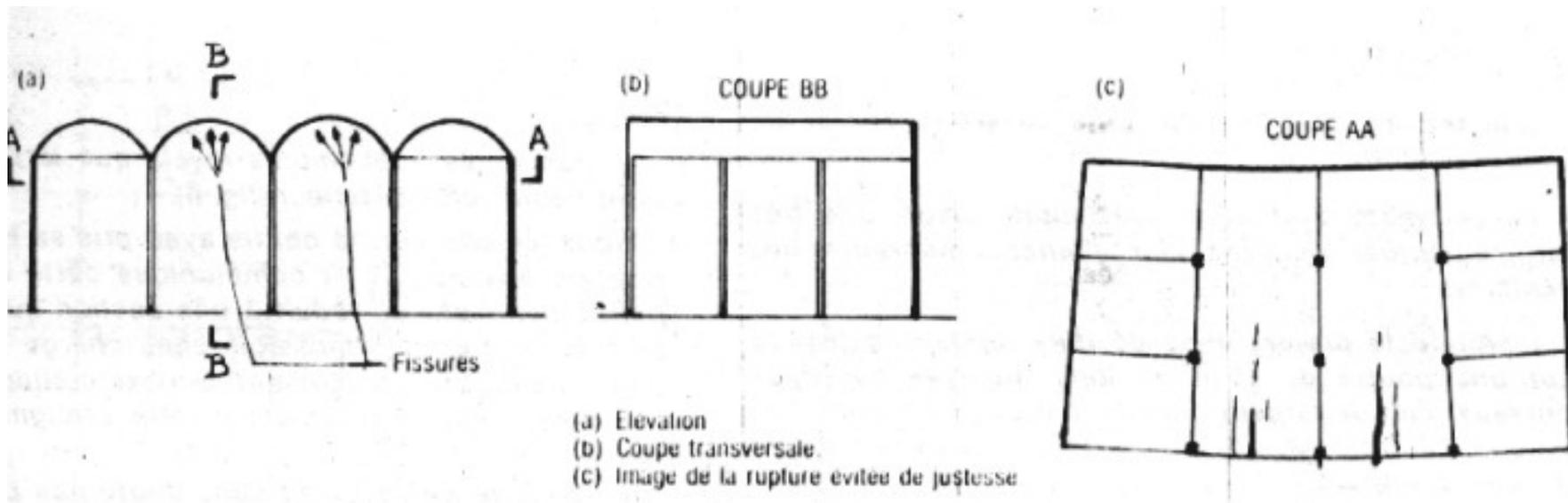
Un raisonnement aussi désastreux conduit à arc buter des voûtes les unes aux autres et à affirmer que l'ensemble est en équilibre, du moment qu'on assure l'équilibre des travées d'extrémité par un tirant.



Exemple 4 : des voûtes se fissurent gravement au décoffrage. On avait construit une série de 4 voûtes sur poteaux pour constituer un abri en bordure d'une cour et l'on n'avait équipé de tirants que les 2 voûtes d'extrémité.

Par bonheur, les voûtes étaient solidaires d'un mur de fond et cela les sauva du désastre.

Peu après le décoffrage, des fissures largement ouvertes apparurent en intrados au droit des clés de voûtes intermédiaires.



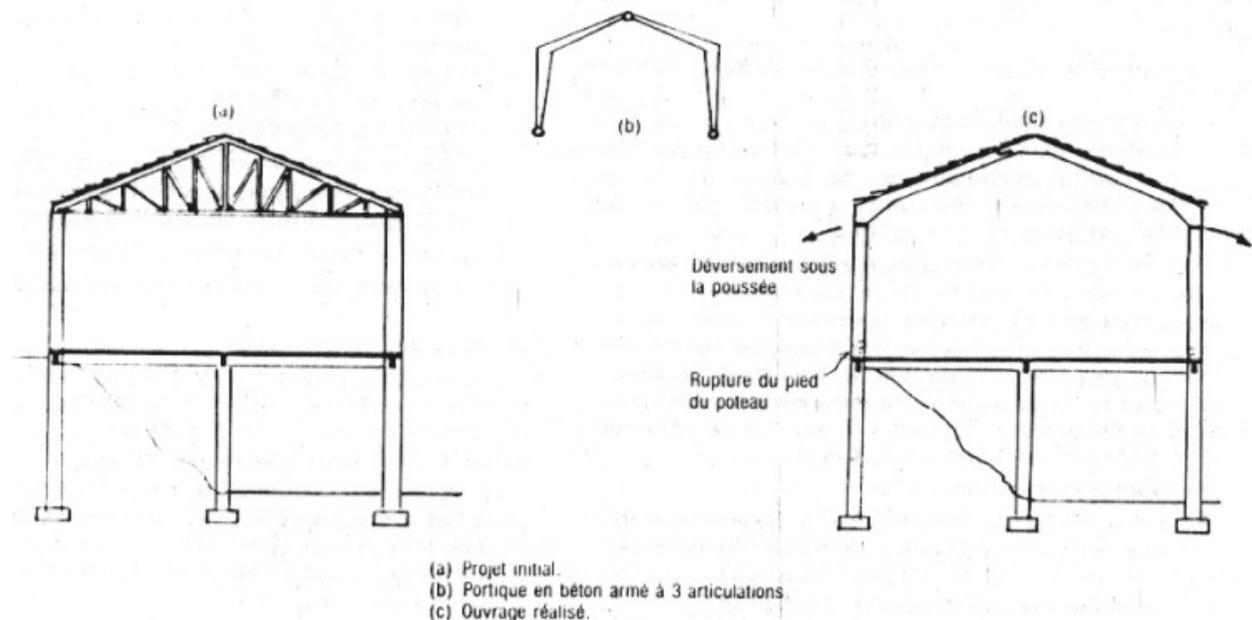
Causes : l'économie des tirants était tellement minime que le projeteur ne pouvait même pas l'évoquer pour se disculper. Les voûtes se seraient certainement écroulées si le mur du fond n'avait apporté une action stabilisatrice en empêchant l'ouverture en éventail que devait provoquer l'aplatissement des voûtes.

Parfois l'appréciation du comportement des matériaux passe par un arrêt des études, et leur reprise par une autre personne n'est pas toujours sans ennui.

Exemple 5 : un bâtiment s'effondre une fois la dernière tuile posée.

Un propriétaire avait fait construire un bâtiment à deux niveaux, dont la toiture devait être portée par une charpente métallique de type

classique à deux versants. Les fermes de forme traditionnelle à tirant, devaient reposer sur des poteaux en béton armé dimensionnés pour résister et à la charge et au vent.



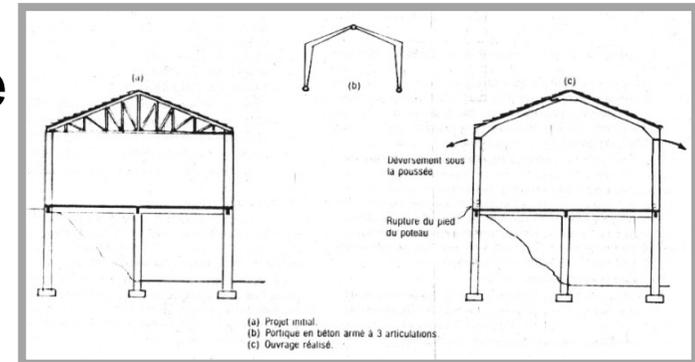
La charpente n'était pas encore posée quand ce propriétaire mourut ; l'architecte aussi.

Le nouveau propriétaire trouva plus

économique de remplacer la charpente par des portiques en béton armé à trois articulations sans tirant, en vogue pendant cette période.

Comme les poteaux existaient, il commanda des portiques amputés de leurs poteaux. Et les fit sceller sur les poteaux en place. On posa après pannes, chevrons, liteaux et la couverture en tuiles. Puis, tout l'étage s'effondra.

Causes : la liaison réalisée entre poteaux et arbalétriers en béton armé ne pouvait guère transmettre le moment de continuité. Dès lors, un moment considérable se développa en pied des poteaux qui n'étaient guère dimensionnés pour résister à ces efforts.



Moralité : il convient toujours de s'intéresser de très près des structures existantes sur lesquelles de nouvelles prennent appui.

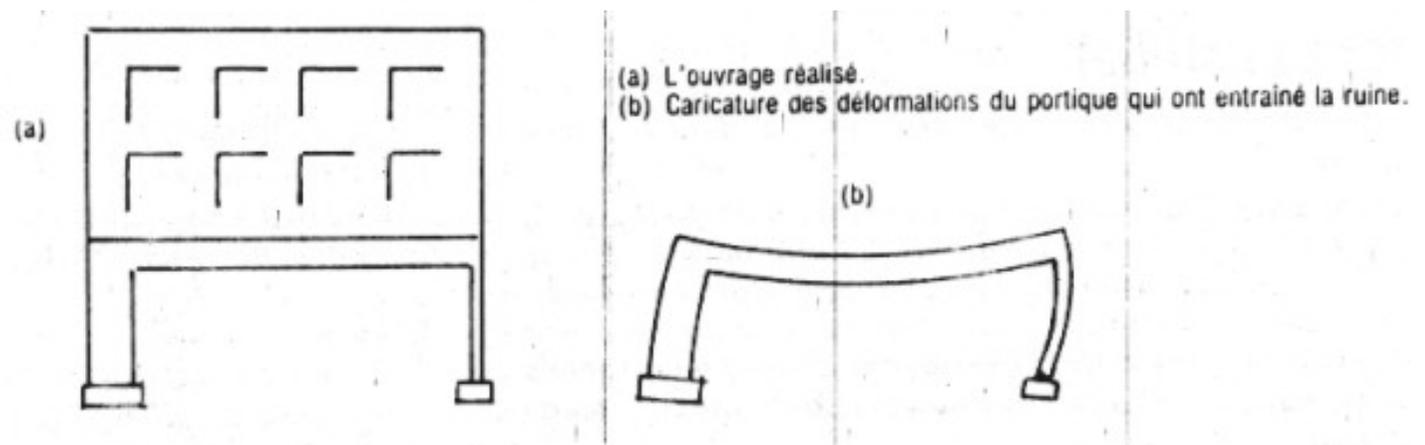
iii., instabilité mécanique :

Le monolithisme du béton armé ne fournit à ses réalisations pas l'avantage de l'hyperstatisme. Il faut parfois dépenser beaucoup d'argent dans la réalisation d'articulations.

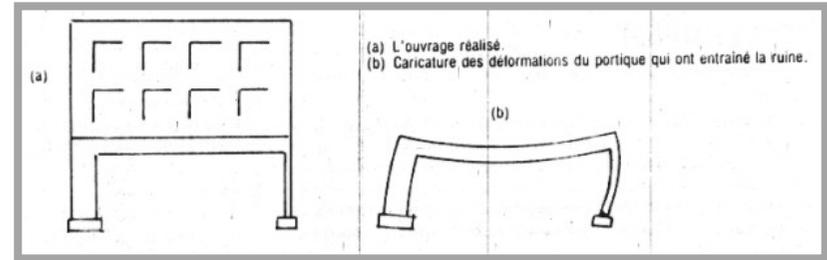
Exemple 6 : une façade de garage à large ouverture en RDC s'effondre.

Le garagiste souhaitait, avec juste raison, une très large

ouverture sur la rue pour faciliter la manœuvre des véhicules. L'architecte projeta alors de faire reposer la façade sur une poutre de 15m de long appuyée sur 2 poteaux, l'un de largeur confortable et l'autre mince.



Le projeteur conçut une poutre de 25x110 cm, et l'arma fort correctement avec chapeaux se retournant dans le gros pilier par contre l'autre est traité comme un poteau ordinaire. Vers la fin de la construction, l'ouvrage s'effondra.



Causes : l'examen des décombres révéla que le pilier mince avait fléchi vers l'extérieur. Sous les charges, la poutre avait pris sa flèche, avec rotation aux appuis. Cette rotation amenant un moment de flexion, vient s'ajouter à la charge contrée au niveau du pilier mince où les contraintes atteignirent la rupture. Ce sinistre ne se serait pas produit si le pilier en question avait été équipé de 2 articulations.

iv., chocs et vibrations :

Un ouvrage près duquel manoeuvrant des véhicules ou engins est sujet un jour où l'autre à l'effet d'un impact du à une fausse manoeuvre ; il convient donc d'apprécier la force d'impact prévisible et de prémunir l'ouvrage contre cette force.

Exemple 7 : un abri d'autobus s'effondre, un mort.

Il s'agit d'un auvent supporté par une file unique de poteaux de section réduite à la base. L'ouvrage n'était pas prévu pour résister à d'autres forces horizontales que le vent, et de plus, les aciers des poteaux étaient placés avec un trop grand recouvrement. En outre, les services techniques de la ville, avaient demandé une hauteur libre de 4m, et elle ne faisait que 3.60 m.

Un jour un gros camion remorque chargé de lourdes pièces de bois se trompa de direction et eut à faire demi tour à cet endroit. Un agent de la circulation verbalisa, puis guida la manœuvre. Mais en reculant, le haut du chargement heurta le haut de l'auvent. Celui-ci s'abattit et l'agent, posté là, fut tué.

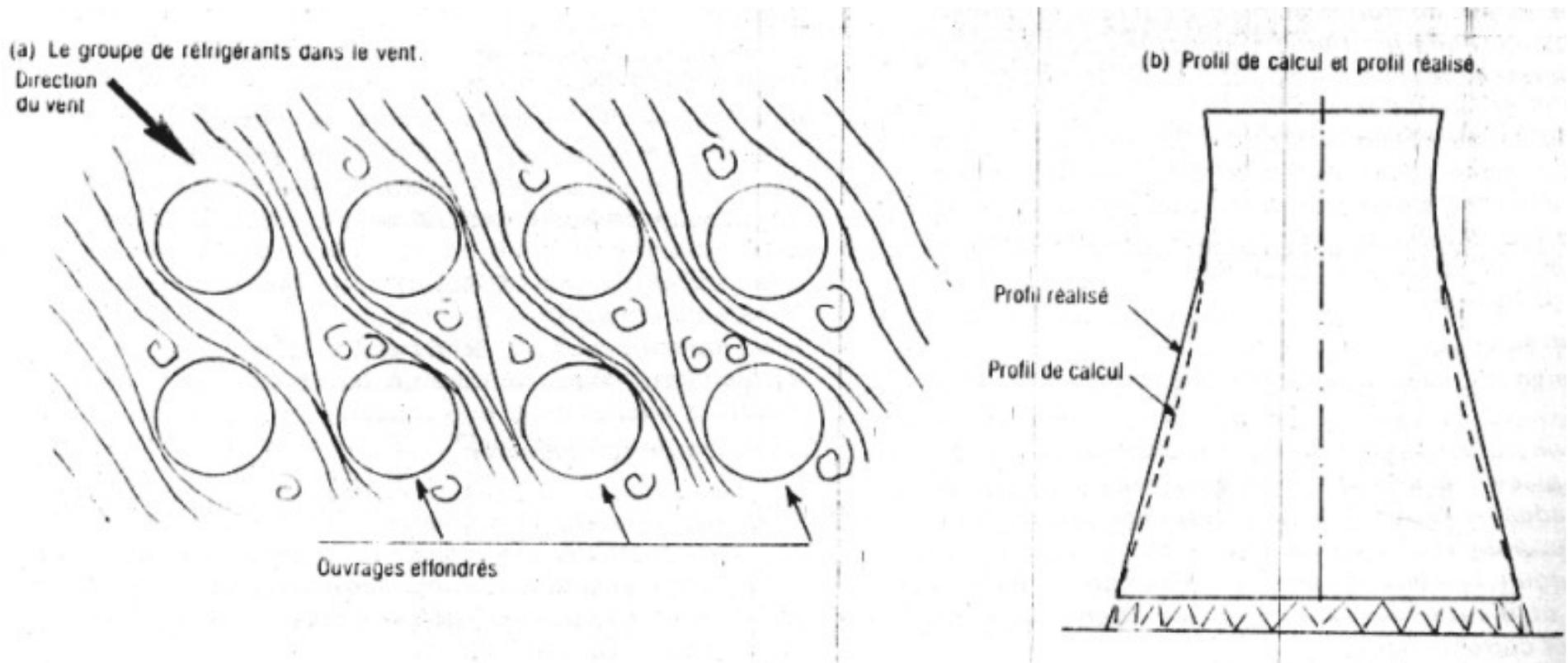
Moralité :

- 1., un ouvrage doit résister, non seulement aux efforts de service, mais aussi aux efforts accidentels normalement prévisible,
- 2., l'imposition des gabarits routiers aux ouvrages concernés relève de la logique et doit être respectée.

Beaucoup plus délicate est l'appréciation des vibrations que subit un ouvrage suite à une excitation ainsi que des suppléments de contraintes dont il sera le siège. Des modèles mathématiques sont capables d'apprécier les périodes propres des ouvrages ; il suffit néanmoins de connaître celle de la force excitatrice pour éviter que l'ouvrage ne risque d'entrer en résonance. Cependant quand les périodes propres de la force excitatrice ne sont pas connues, tel le cas du vent, cela pose problème ; les essais en modèle réduit (soufflerie) sont nécessaires. Ce sont les cheminées d'usine et les aéroréfrigérants de centrale électrique qui en subissent les conséquences.

Exemple 8 : trois aéroréfrigérants de 100 m de haut s'effondrent, le 1er novembre 1966 dans le Yorkshire en Angleterre, un jour de grand vent.

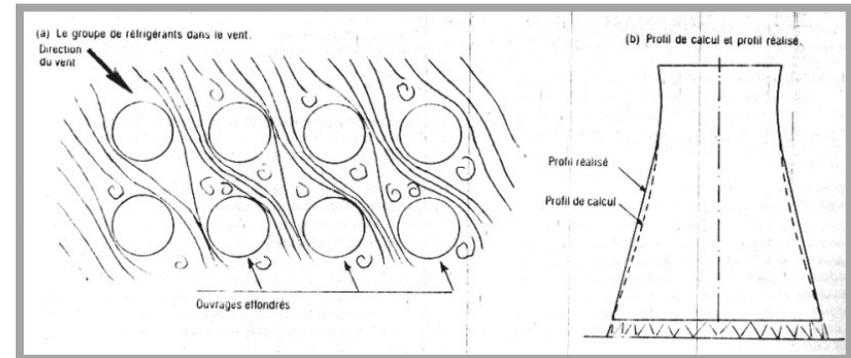
Pour sa nouvelle centrale électrique du Ferrybridge, le CEGB fit construire 8 réfrigérants disposés par quatre en deux rangs, assez serrés les uns contre les autres. Ce jour, le vent soufflait en tempête et les rafales atteignaient 130 km/h.



Bien que les réfrigérants aient été calculés pour résister à des vents de 180 km/h, 3 s'écroulèrent et ces 3 là étaient abrités du vent par d'autres qui résistèrent.

Causes : les huit ouvrages sont identiques en conception, dimensionnement, ferrailage, matériaux et réalisation. Si trois d'entre eux seulement se sont rompus c'est que quelque chose les différenciait des autres ; et ce quelque chose ne peut être que le vent.

Un ouvrage masqué du vent par un autre ne s'en trouve pas toujours abrité, c'est le contraire qui s'est produit dans ce cas. En effet, les réfrigérants se situant en première



ligne au vent, formant obstacle, avait réduit la section d'écoulement, entraînant des accélération de turbulences en arrière, produisant un vent plus dangereux pour les obstacles suivants. Aussi, les règlements britanniques de l'époque ne prescrivaient aucune vérification sous vent 'extrême' majoré de coefficients dynamiques. De plus, l'entrepreneur n'avait pas réalisé exactement le profil de méridienne prévu. Au lieu de donner une courbure nécessaire à la stabilité ; il avait tiré droit, transformant toute la partie inférieure en tronc de cône ; ce qui nuit fortement à la résistance au vent. A l'époque, ces énormes cheminées aux épaisseurs de coquilles d'œuf (8-10 cm) étaient considérées comme des membranes travaillant en compression-traction-cisaillement. On s'arrangeait qu'il n'y ait point de flexion et l'armature était concentrée en nappe croisée à mi-épaisseur.

Aujourd'hui l'épaisseur est plus grande (20-30 cm en sections courantes pour les très grandes tours) et deux nappes d'armatures croisées.

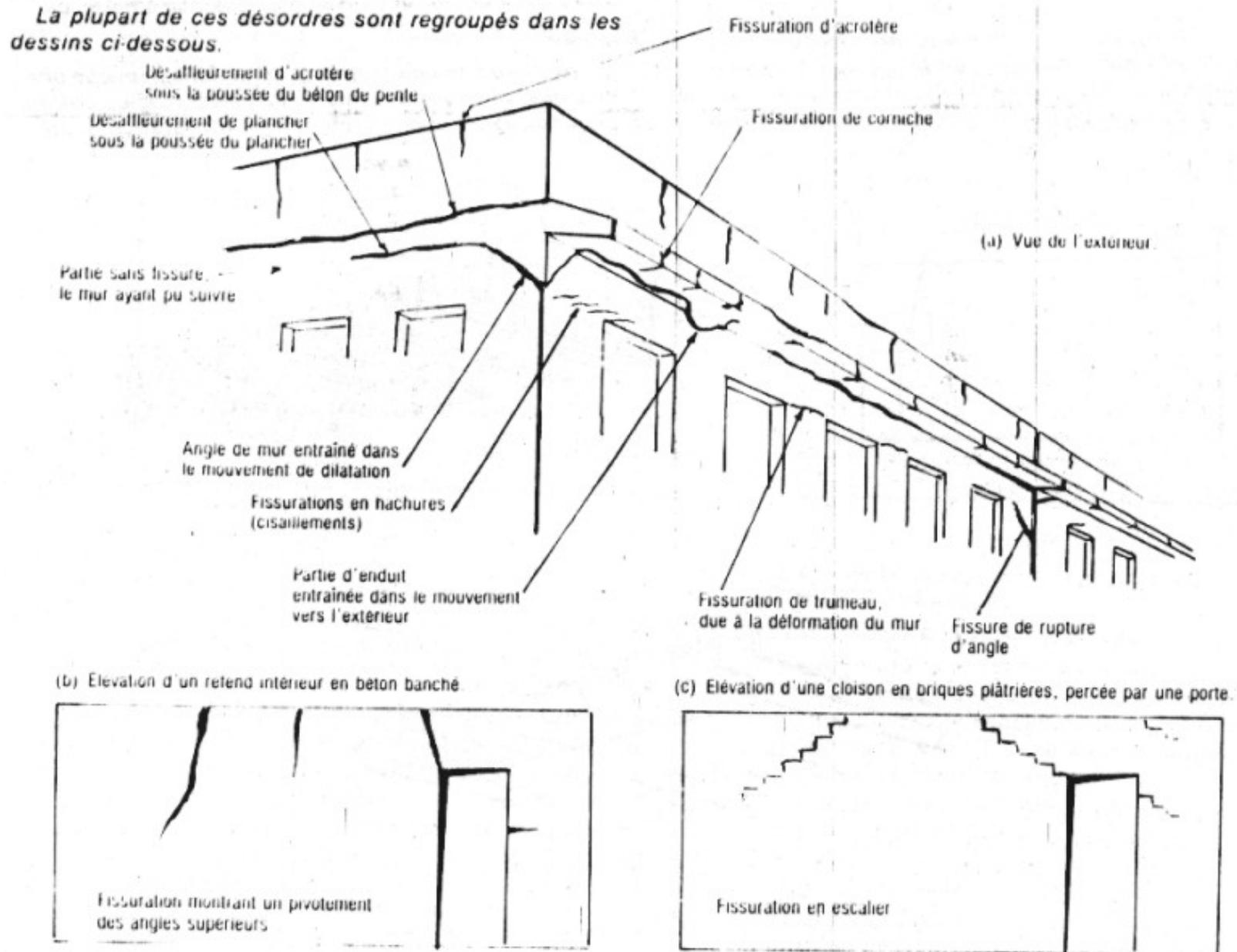
Moralité : quand le vent est trop fort, il est fort recommandé d'éviter de se rapprocher trop près des réfrigérants de la génération du Ferrybridge.

v., variations dimensionnelles incompatibles :

Le béton matériau poreux, est sujet aux variations dimensionnelles quand sa température et son hygrométrie changent. La dessiccation du béton frais conduit à sa contraction qui produit le phénomène de retrait. Ensuite, toute réhumidification, toute élévation de température provoque une dilatation.

Dans les zones exposées au soleil et au froid comme celles des toitures terrasses, l'alternance de ces deux phénomènes sont responsables de fissuration s'ils sont trop importants.

Exemple 9 : désordres multiples que peut causer une toiture terrasse.

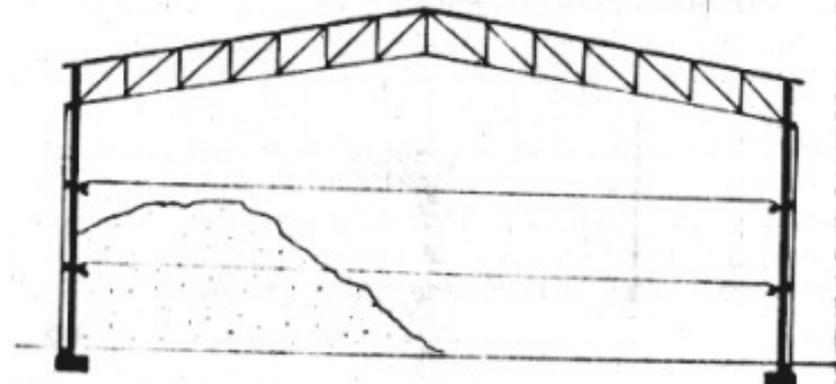


5.3. Dimensionnement défectueux.

i., mauvaise prise en compte des données : choisir les données de calcul consiste à apprécier correctement l'intensité des charges et leur répartition qui n'est pas toujours uniforme. Avant de se lancer dans les calculs, il convient d'appréhender tous les cas de charge que peut subir l'ouvrage durant sa construction et son existence. Certains phénomènes mal connus, tels que les poussées et les butées, doivent être appréciés avec beaucoup de prudence.

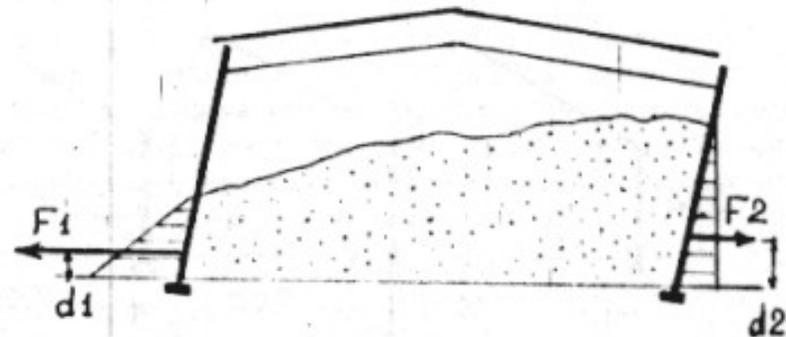
Exemple 10 : un silo à grain en forme de hangar rectangulaire s'effondre partiellement au cours du premier remplissage.

Cet ouvrage carré de 17 m de côté et de 6 m de hauteur sous entrain, comportait des murs latéraux en béton armé quadrillés de nervures et une toiture légère en charpente métallique.



a) Hangar à grain, avec le chargement désaxé qui a pu suffire à le faire écrouler.

son entre tirants et murs.



(b) Déformation (caricaturée) nécessaire pour équilibrer une poussée F_2 par une butée F_1 grâce à l'équilibre des moments :
 $F_1 d_1 + F_2 d_2 = 0$.

Les murs latéraux devaient travailler en flexion sous la poussée du grain, avec appui au croisement des nervures grâce à de simples tirants en fer ronds de 20 cm de diamètre qui traversaient le hall et étaient retenus de chaque côté par l'effet de poussée.

L'idée paraissait ingénieuse et très économique. Bien entendu les poussées ne sont jamais parfaitement équilibrées, mais on comptait sur la marge très importante qu'il y a toujours entre la limite d'équilibre supérieur de butée et la limite inférieure de poussée, la première mobilisant des forces 5 à 10 fois supérieures à la seconde.

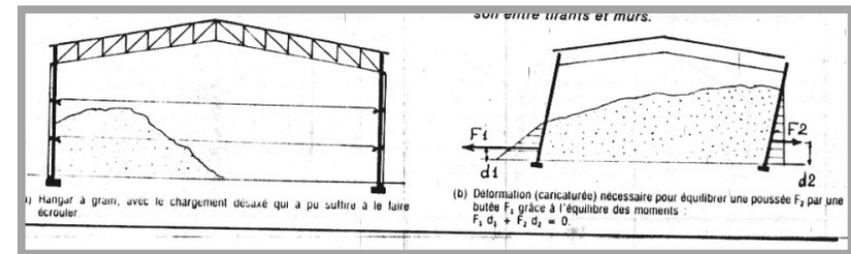
Ainsi, la butée d'une charge de grain même faible d'un côté équilibrait toujours et au-delà,

croyait-on, la poussée d'une masse même très importante de grains de l'autre. Cette idée séduisante est dangereuse :

1., d'abord on omet le cas probable où le grain subsistant d'un seul côté, appuierai sur une seule paroi,

2., ensuite on ne tenait pas compte des déformations et déplacements très importants de la paroi, nécessaires à la mobilisation de la butée. De telles déformations n'auraient pas été longues à détruire la charpente métallique portant la couverture.

Causes : c'est une erreur de détail qui fut à l'origine de l'effondrement : les tirants de $\Phi 20$ n'étaient même pas ancrés dans la paroi en béton, leurs extrémités étaient simplement courbées en crosse et passées dans des étriers scellés dans les murs. L'examen des décombres révéla que les crosses s'étaient ouvertes.



Moralité :

1., Il est toujours dangereux de compter sur la présence d'une charge d'exploitation pour assurer la stabilité d'un ouvrage,

2., La résistance d'une chaîne n'est pas supérieure à celle du maillon le plus faible. Ici, la chaîne des efforts qui devaient concourir à la stabilité passait par la liaison entre tirants et murs.

ii., n'oublier aucune charge : parfois des pièces sont calculées pour une fonction et il s'y ajoute d'autres sollicitations non prévues :

- Un tirant traversant une cellule de silo va être noyé dans les grains et subir une charge, difficile à apprécier mais considérable,
- Un tirant noyé dans le sol va subir le tassement de celui-ci.

iii., ne pas ajouter de charges sans vérifier les calculs : il arrive qu'en cours de construction,, des modifications de dernière minute sont demandées. Les déplacements de cloisons ne sont pas rares. Si elles sont légères, le calcul du plancher n'en est pas affecté ; par contre si elles sont lourdes une vérification est indispensable.

Des problèmes analogues se posent en cas de supplément de poids : meubles lourds (coffre forts), alourdissement de cloisons (rangement d'ouvrages), etc.

5.4. Déficiences des plans.

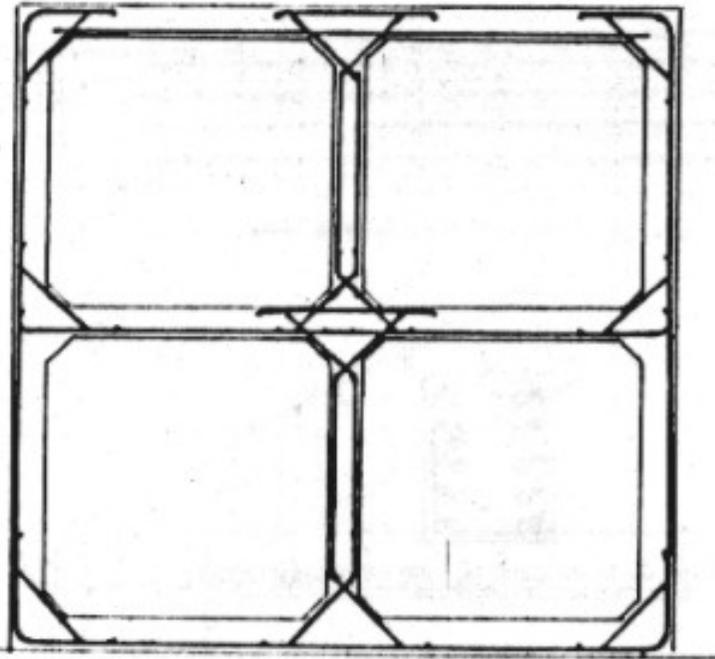
a., Ferrailage défectueux :

Les armatures peuvent être insuffisantes en section, longueur et ancrage, impossible à réaliser à l'image du plan, ou exercer sur le béton des efforts excessifs.

i., *armatures de flexion* : le rôle des armatures étant essentiellement de reprendre des efforts de traction, l'ingénieur cherche à les adapter au mieux aux moments calculés. Si une légère sous-estimation des sections est rarement grave, une erreur de signe l'est davantage.

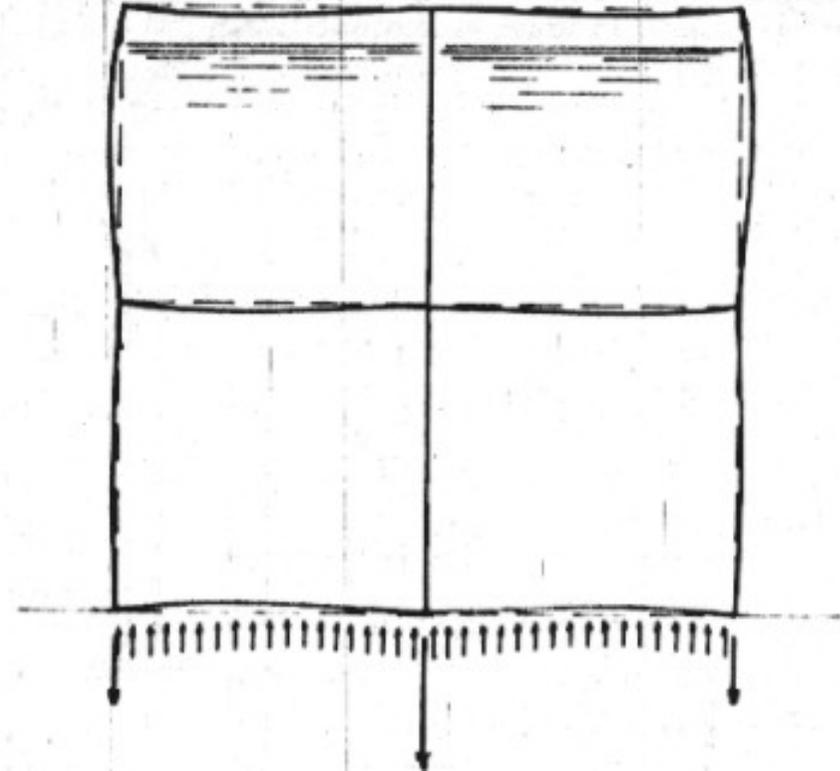
Exemple 11 : un radier de cuve se fissure peu après sa mise en service.

Il s'agit d'une batterie de deux cuves à 2 niveaux posées directement sur le sol. La pression du liquide engendre sur les parois des flexions qui mettent en tension leur parement extérieur dans leur zone centrale.



(a) Coupe transversale, avec schématisation du ferrailage du radier.

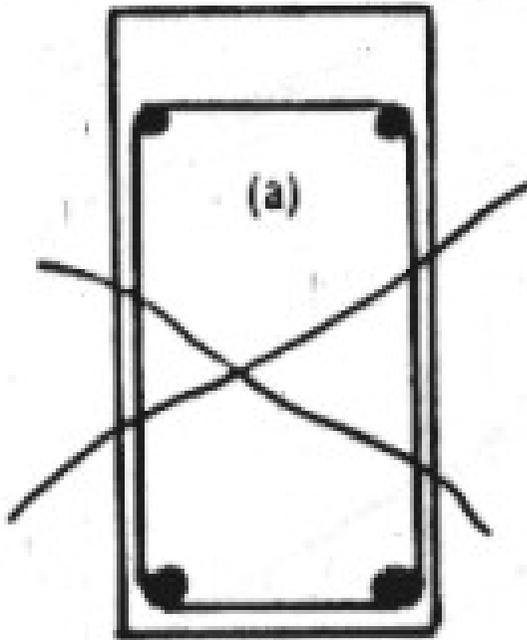
(b) Schéma des déformations sous flexion quand les deux cuves sup sont pleines.



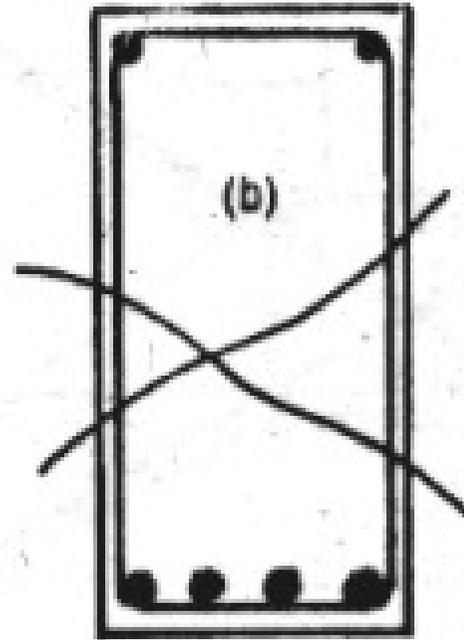
On n'a donc pas besoin d'armatures côté intérieur et l'ingénieur n'en a pas prévu. Les cuves reposent sur le sol et le radier est ferrillé uniquement dans sa partie inférieure. C'est pourtant en pleine zone centrale des panneaux du radier que des fissures apparaissent. Dans ce type d'ouvrage, toute fissure est préjudiciable car elle affecte l'étanchéité et sont la cause d'une fuite immédiate.

Ca
tra
sol
des
tra

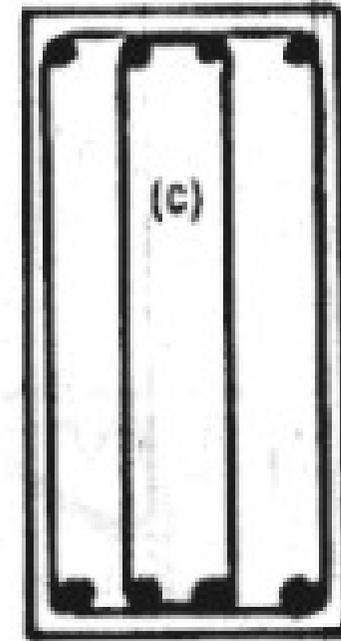
Re
po



MAUVAIS



MAUVAIS



BON

e
u

Mo
dia
con
de |

Armatures transversales :

- (a) l'armature transversale n'enveloppe pas correctement la zone comprimée du béton ;
- (b) l'armature longitudinale médiane est mal cousue ;
- (c) disposition correcte.

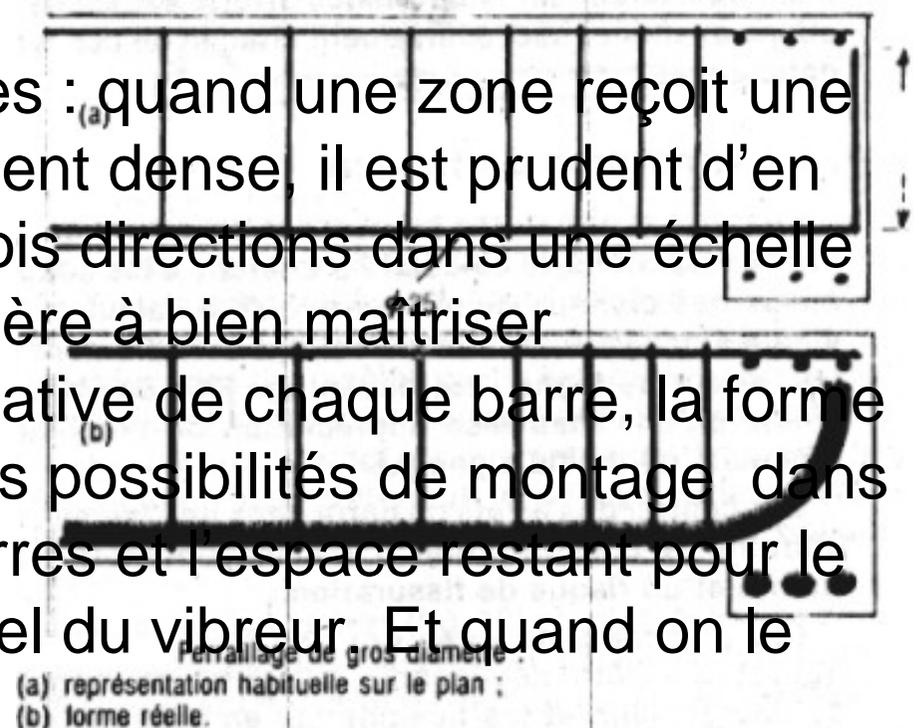
e

ii., armatures d'effort tranchant : les armatures transversales des poutres participent au bon fonctionnement de flexion dans les zones de variation des moments ; elles doivent donc envelopper et coudre toutes les armatures longitudinales. Il faut aussi les répartir selon l'enveloppe des efforts tranchants.

iii., dispositions impossibles à réaliser :

*/ Crochets trop brusques : les dessins courants d'armatures négligent de représenter les coudes à l'échelle ; certains projeteurs les représentent même en angle vif. Le ferrailleur connaît en principe le diamètre du mandrin à employer pour chaque section d'armature (lecture sur un tableau standard). Quand il s'agit de gros diamètres, les aciers cintrés passent loin des arrêtes du béton que le projeteur pense pourtant correctement ferrillés,

*/ Densité d'armatures excessives : quand une zone reçoit une quantité d'armatures anormalement dense, il est prudent d'en dessiner des coupes dans les trois directions dans une échelle assez grande (1/2 ou 1) de manière à bien maîtriser l'encombrement et la position relative de chaque barre, la forme réelle des coudes et crochets, les possibilités de montage dans l'ordre de mise en place des barres et l'espace restant pour le béton et pour le passage éventuel du vibreur. Et quand on le fait, il faut bien le faire.



Exemple 12 : Déchirure de nœuds de poutres en treillis et menace d'effondrement, par suite d'un coudage excessif des armatures.

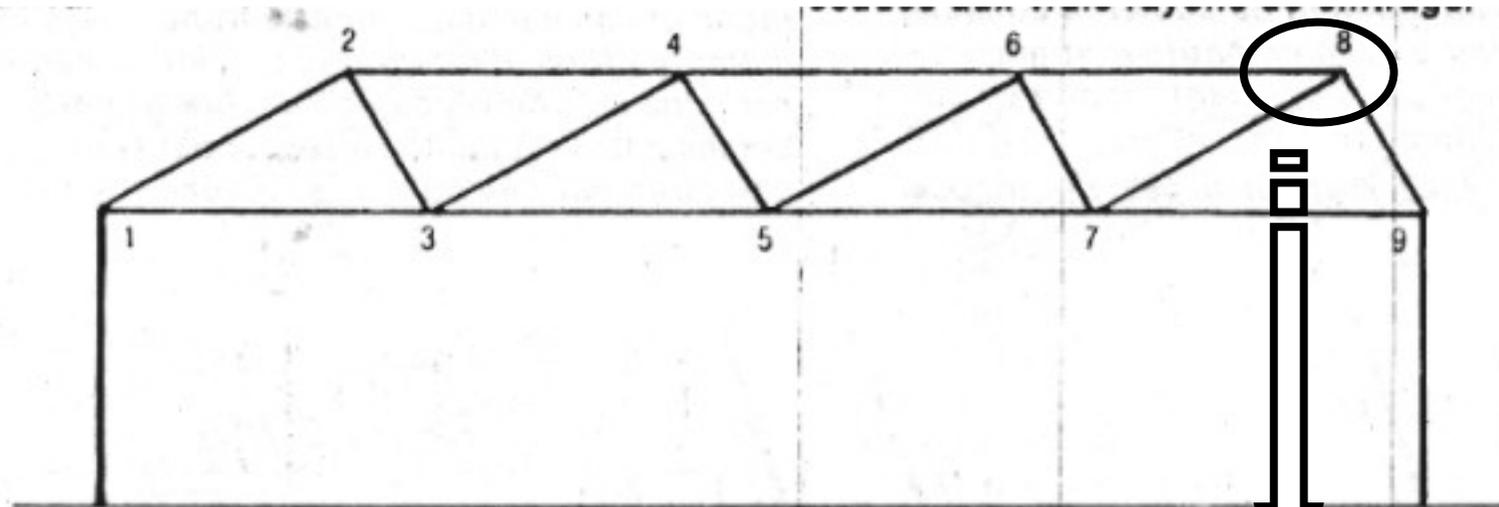
Des poutres de 27 m de portée, en forme de quadruple shed devaient porter la couverture d'un vaste atelier avec dalles de béton nervurées du côté des versants opaques.

Les aciers de nuance FeE24 acier doux faisaient en ce temps concurrence au FeE40 Haute Adhérence. Le projeteur avait terminé ses plans quand l'entrepreneur vint lui annoncer qu'il ne pouvait se procurer la nuance FeE40 souhaitée et lui demander de revoir son projet avec FeE24.

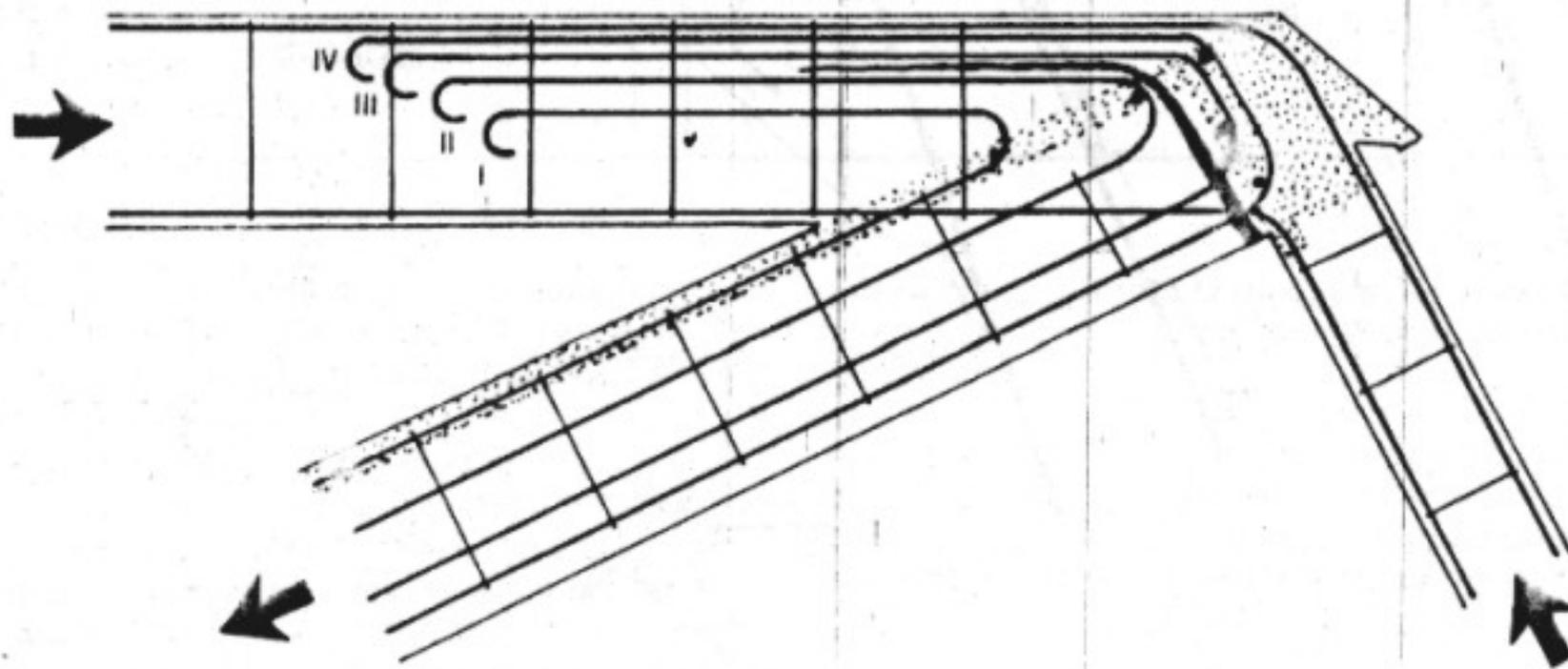
Le projeteur augmente les sections de toutes les barres :

*/ les HA 14 deviennent des HA 18,

*/ les HA 25 deviennent des HA 32, etc.



(a) Vue d'ensemble d'une poutre en quadruple shed.



(b) Ferrailage et aspect de la déchirure du nœud 8.

Sur ses plans de détail qui représentaient dans les noeuds le tracé souhaité de toutes les armatures, il se contenta d'ajouter des crochets d'extrémité. Pourtant dans le nœud 8, le rayon de cintrage des barres principales, déjà trop petit, devenait inadmissible : mesuré à l'échelle, on lisait de l'ordre de 6 cm comme pour un $\Phi 8$. Le danger d'un tel cintrage était double :

- Fissuration de l'acier au façonnage, suivie de sa rupture en service,
- Ecrasement du béton (souvent mal compacté) à l'intérieur du coude.

C'est ce qui arriva.

Après le coulage de l'ensemble, on avait décoffré les dalles des couvertures et l'on enlevait les derniers étais sous les nœuds inférieurs des poutres en treillis, quand des craquements se firent entendre et le nœud 8 se fissurait.

Ce phénomène peut s'expliquer
comme suit :

Les barres I et II écrasèrent le
béton dans leur pliure,

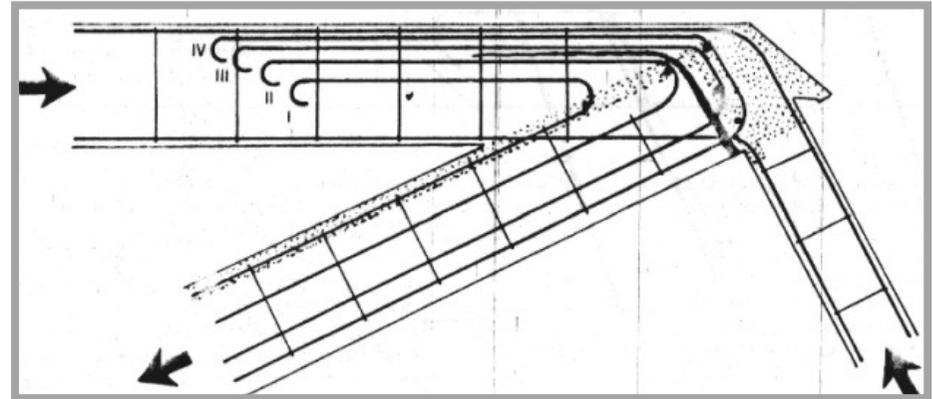
Les barres III et IV devenant
insuffisantes pour absorber les

tractions, s'allongeaient en phase plastique,

La membrure supérieure commençait à se diviser en deux feuillets :
un feuillet supérieur arc-bouté sur la diagonale comprimée de droite,
et un feuillet inférieur qui commençait à pivoter, entraîné vers le bas
par la diagonale tendue de gauche.

Il convient de noter dans ce projet, l'insuffisance notoire d'armatures
de couture transversales.

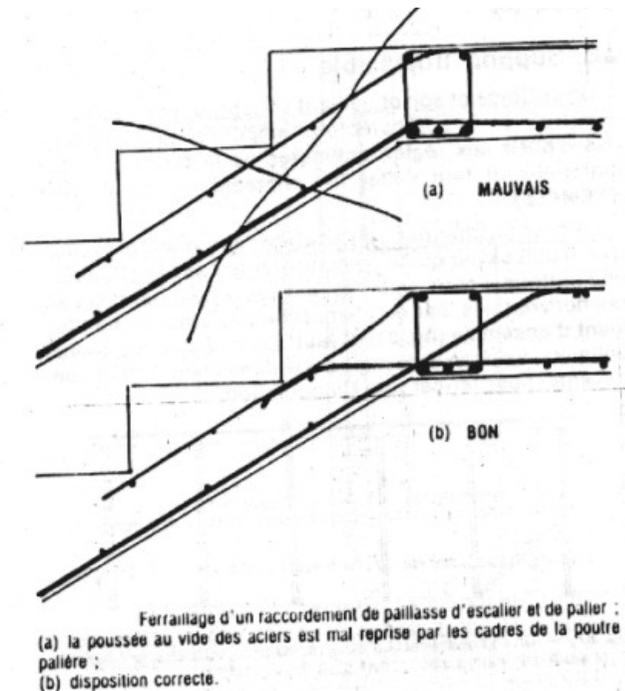
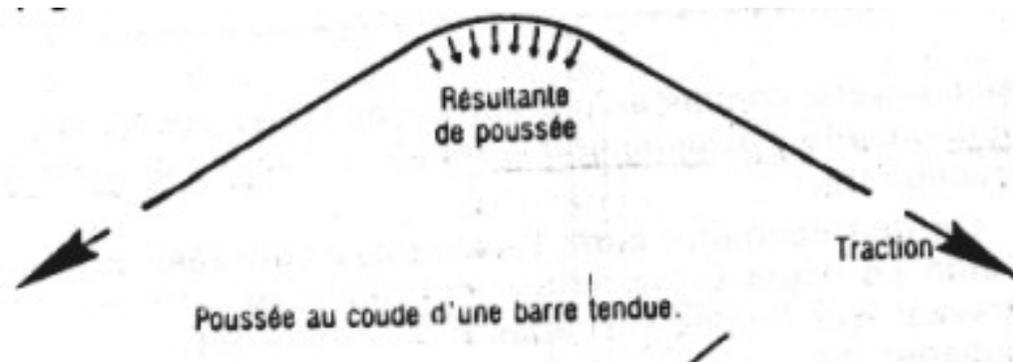
Remède : Démolition du nœud 8 et les barres qui y
aboutissaient jusqu'à mi-longueur et on réalisa un nouveau
dispositif, mieux profilé, avec acier HA et armatures
complémentaires adéquates. Les autres nœuds ne posaient
pas de problèmes.



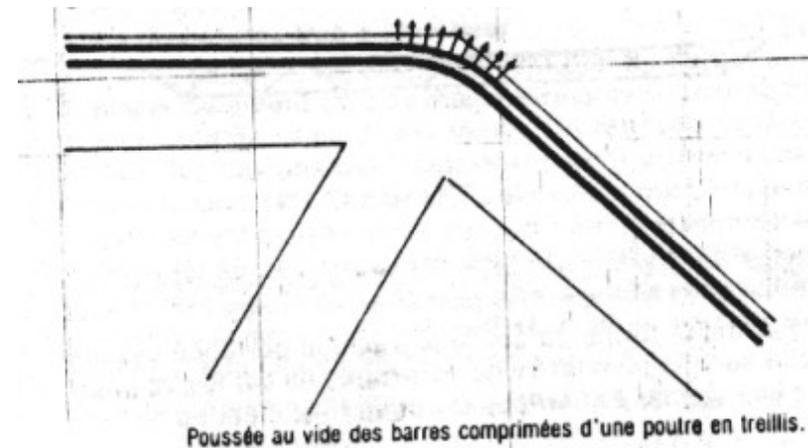
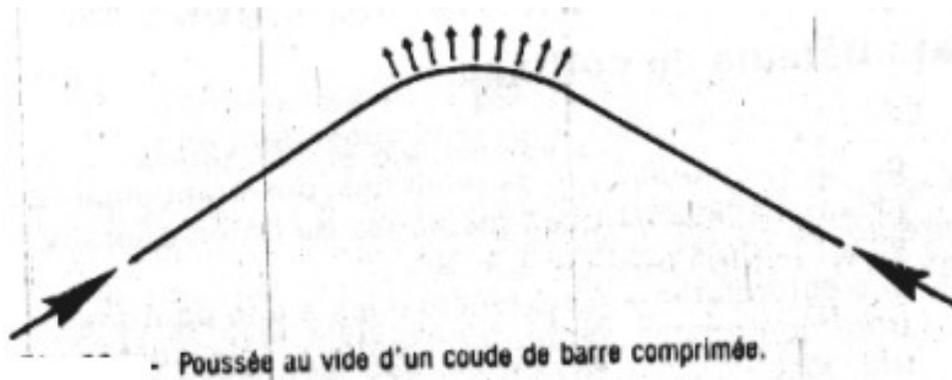
Moralité : Dans les zones de ferrailage difficile, il est toujours recommandé de dessiner les armatures à grande échelle...en vraies dimensions ; sans tricher.

iv., Dispositions dangereuses :

* / Poussée au vide des barres tendues : tout coudage, même de courbure raisonnable, fait que la déviation de traction dans l'acier entraîne une résultante le long du coude à reprendre soit par le béton, soit par des aciers de couture si la fissuration est peu nuisible. Ce principe d'équilibre des forces est parfois oublié.



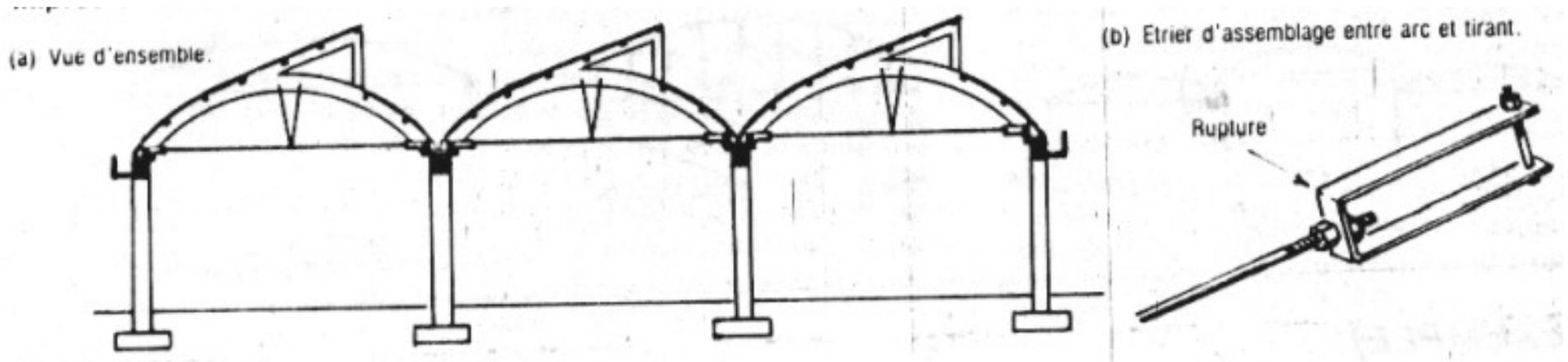
* / Poussé au vide des barres comprimées : une barre comprimée coudée pousse au vide comme une barre tendue, mais en sens inverse. Elle doit alors rencontrer devant le coude, soit une masse de béton de résistance suffisante, soit des aciers de couture et certaines dispositions sont à éviter..



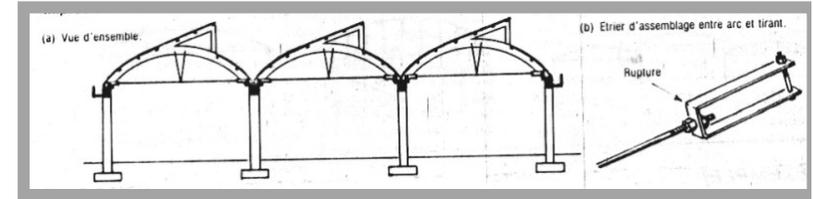
* / Appareillage mécanique au fonctionnement mal connu : il est dangereux d'introduire dans un projet et de dimensionner un matériel dont on connaît mal son fonctionnement sans s'entourer de l'avis des spécialistes (dispositif d'appui, de traction, de précontrainte, etc.).

Exemple 13 : un atelier de 1500 m² s'effondre brusquement 15 jours après son achèvement.

Ce bâtiment comportait trois nefs couvertes en dalle de Béton armé préfabriqué portés par des arcs de 8 mètres de portée. Le tirant de ces arcs était réalisé à partir d'un acier de nuance FeE24 et de diamètre 20 mm, terminé à chaque extrémité par un étrier à fer plat boulonné dans l'arc. L'effondrement se produisit un soir, heureusement après le départ de tous les ouvriers du chantier. La réception des travaux devait avoir lieu une semaine après et 1200 ouvrières et ouvriers devaient occuper ces locaux.



Causes : L'examen des décombres révéla que tous les tirants avaient rompu de l'un de leurs deux étriers



d'extrémité et l'on s'aperçut très vite que c'était probablement la cause principale du sinistre. Le projeteur n'avait probablement qu'une idée imprécise de la distribution des efforts dans ces pièces. En béton armé, l'on sait qu'un étrier en acier mi-dur ne doit jamais être déplié après coudage, sous peine de rupture. Or, ici les coudes avaient été écrouis par forgeage et les tractions des tirants les sollicitaient dans le sens de la réouverture. La structure ne disposant d'aucune sécurité, il a suffi probablement de la rupture d'un étrier pour que l'ensemble s'écroule comme un château de cartes.

Moralité : Toute pièce inhabituelle entrant dans une construction et y jouant un rôle primordial doit être parfaitement connue dans son comportement. Faute de savoir la calculer, on doit l'éprouver par des essais probants.

b., Insuffisance ou absence d'indications claires :

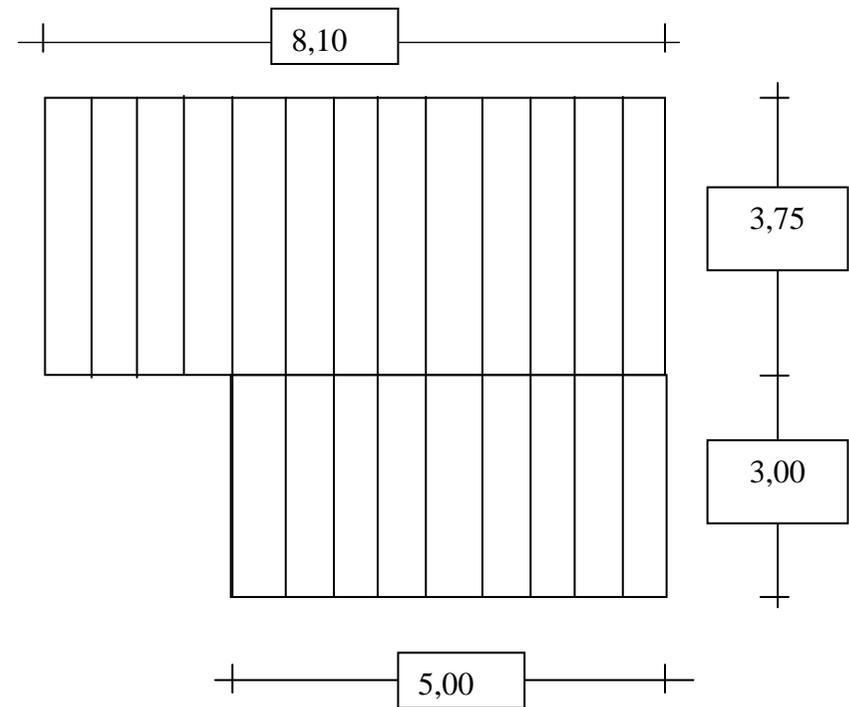
i., plans trop schématiques : les plans d'armatures manquent d'exactitude et ne sont pas toujours réalisés à l'échelle préconisée. Parfois on ne dessine rien, on ne fait que renseigner des tableaux portant des schémas de poutres avec toutes les armatures possibles. L'exécutant souvent interprète mal ces données et de nombreuses erreurs peuvent en résulter.

ii., absence de plans : même pour des ouvrages très simples, des indications verbales, sans plan, peuvent conduire à de mauvaises interprétations et à des catastrophes.

Exemple 14 : un plancher traditionnel d'habitation s'effondre au décoffrage.

Ce plancher couvrait le RDC d'un pavillon à façades et pignons en briques creuses et refends en briques pleines.

Il comportait des hourdis en terre cuite surmontés d'une dalle en béton de 5 cm. Cela était traditionnel pour l'ingénieur, après un petit calcul, il se contenta d'indiquer à l'entreprise locale les armatures à placer dans les nervures.

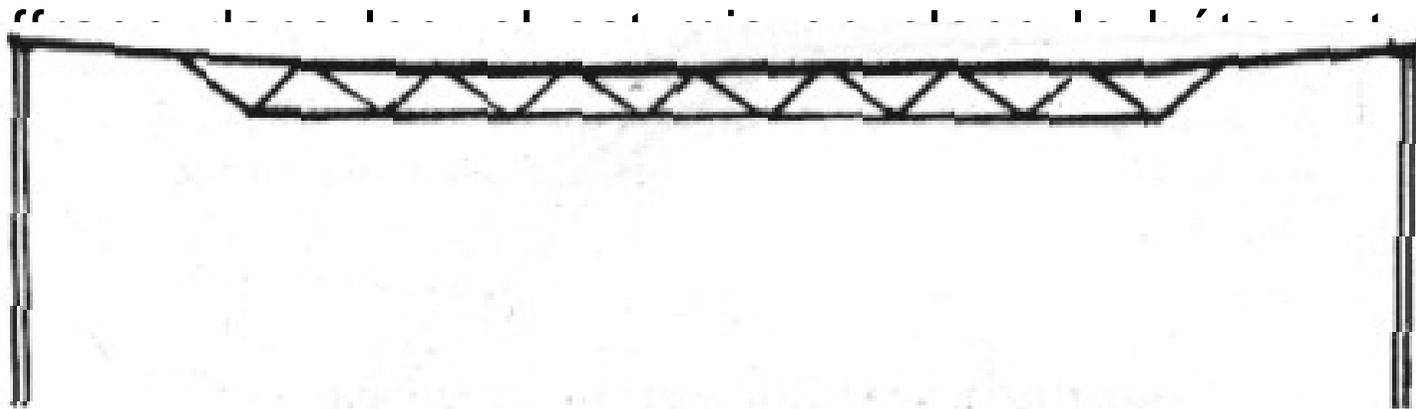


Il avait simplement négligé de préciser dans quel sens elles devaient porter. L'entrepreneur n'avait pas compris que les nervures devaient être posées dans le sens dessiné sur le plan.

5.5. Fautes d'exécution .

a., Fautes portant sur le coffrage et l'étalement :

Le c
épo
pos
les
par
com
petit



Les étais horizontaux télescopiques ont une flexibilité propre, indiquée par le constructeur, dont l'entrepreneur doit tenir compte.

il doit
exact
nt sur
étais
isque
ur les

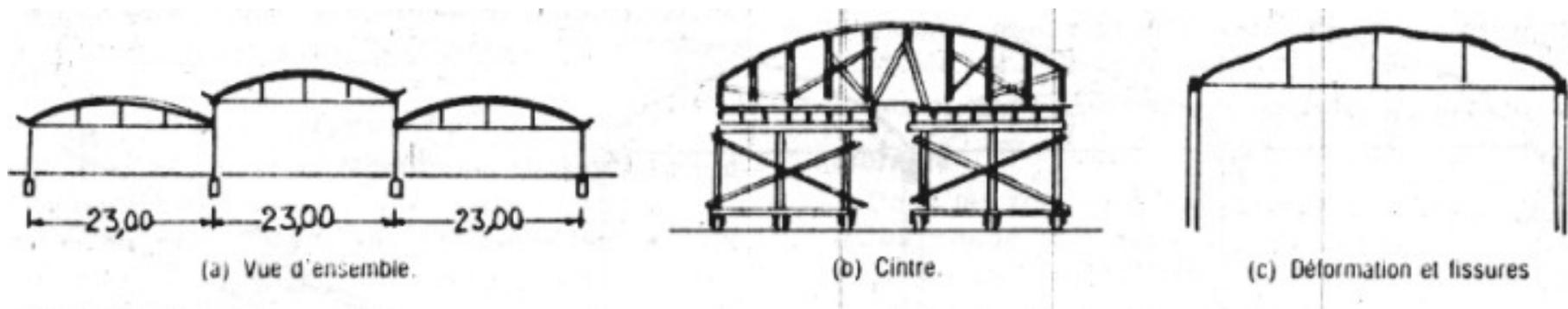
i., défauts de coffrage : les défauts les plus fréquents consiste en

- Des désaffleurements de planches, des bombements locaux nécessitant des meulages onéreux du béton, allant parfois jusqu'aux aciers,
- Des déformations d'ensemble dues à une poutraison trop déformable (étais horizontaux télescopiques), Assemblage de poutres.

Parfois la forme du coffrage a une importance essentielle dans la résistance de l'ouvrage ; tel est le cas pour les voûtes.

Exemple 15 : des voûtes subissent après décoffrage des déformations importantes et doivent être démolies.

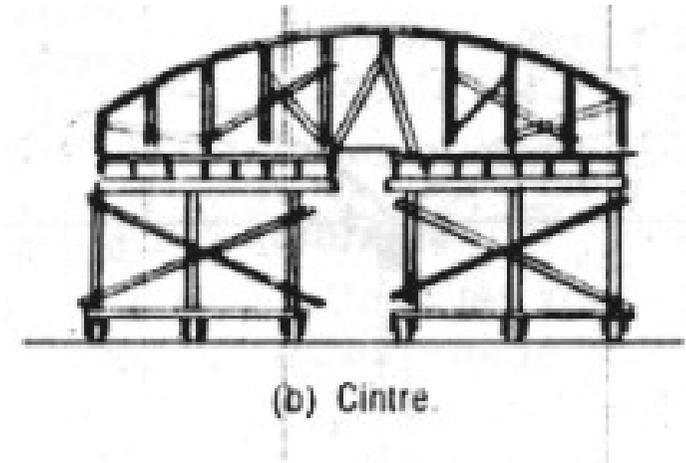
Ce sinistre affecta un chantier qui comportait trois nefs de portée 23m. Les voûtes qui franchissaient des travées de 8 m entre arcs raidisseurs, mesuraient 5 cm d'épaisseur et n'étaient armées que d'un treillis soudé TS5 20x20.



La stabilité d'un tel voile mince implique une ligne moyenne épousant parfaitement le funiculaire des charges, ce qui est d'ailleurs utopique car le funiculaire varie avec le vent et la neige.

Causes : L'entreprise n'avait pas en œuvre les moyens capables de réaliser la forme prescrite avec le maximum de précision :

- D'une part, elle avait un matériel trop artisanal ; le cintre entièrement en bois, comportait deux parties : celle inférieure, atteignant la sous face des tirants et roulant sur galets d'une travée à l'autre ; et la partie supérieure



constituée d'étais radiaux, de pannes et de planches. Pour passer d'une travée à l'autre, il fallait démonter et remonter entièrement cette partie délicate.

- D'autre part, les planchers étaient disposés selon les directrices et cintrés à force, au lieu d'être alignés dans le sens des génératrices sur des «vaux» taillés en forme. Il en résultait un coffrage tout à fait imparfait, de forme d'ailleurs différente d'un montage à l'autre avec désaffleurements importants, parties droites et jarrets aux abouts de planches⁴⁸

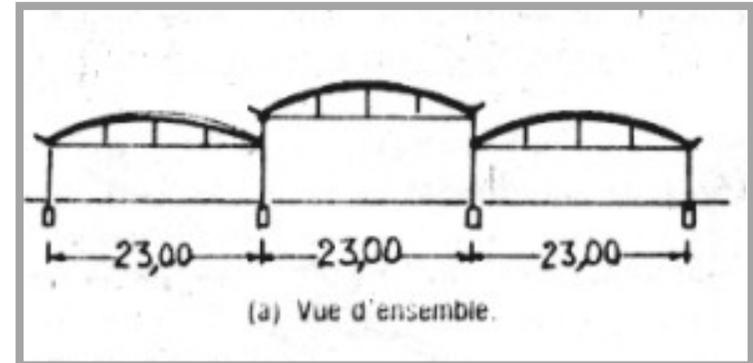
Après décintrement de la première des trois nefs, la voûte trouva son équilibre grâce à trois types de sollicitations :

- Des compressions selon les directrices,
- Des flexions locales dans les zones trop plates ou anguleuses
- Des flexions longitudinales ou des effets de voile tendu entre arcs raidisseurs qui, eux, se déformaient beaucoup moins.

Trop sollicité, le béton subit un lent fluage et développa des fissurations inquiétantes. Au bout de quelques jours, on décida de réétayer.

Ajoutons une autre circonstance qui s'ajoute aux précédentes : le béton avait manifesté plusieurs fois des phénomènes de fausse prise au cours du coulage des voûtes ; sa résistance après durcissement a sûrement été affectée.

Remèdes : il fallait démolir les voûtes déjà réalisées et les reconstruire en renforçant leurs armatures et en doublant le nombre des arcs raidisseurs.



Moralité : les voûtes sont des ouvrages délicats d'exécution et dont la réalisation doit être de haute qualité.

Aussi, pour la préfabrication, les dimensions exactes permettent l'assemblage des pièces avec un minimum d'erreurs.

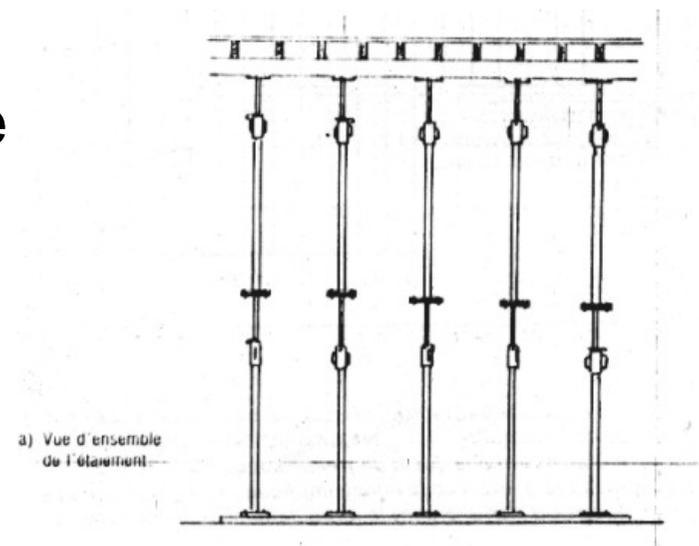
De plus, la nature du coffrage présente un impact sur le béton à l'état frais et durci. C'est ainsi que les coffrages métalliques étanches engendrent des bullages. En revanche, les coffrages en bois gravent sur la surface du béton leur forme. Les architectes peuvent en tirer parti à cause de l'aspect rustique que le dessin des veines de bois offre.

ii., support trop faible : un coffrage et ses étais constituent une véritable construction et son caractère temporaire ne l'empêche pas d'obéir aux règles ordinaires de la résistance des matériaux (RDM). Il faut éviter les châteaux de cartes.

Exemple 16 : un lourd plancher s'effondre en cours de coulage par flambement des étais.

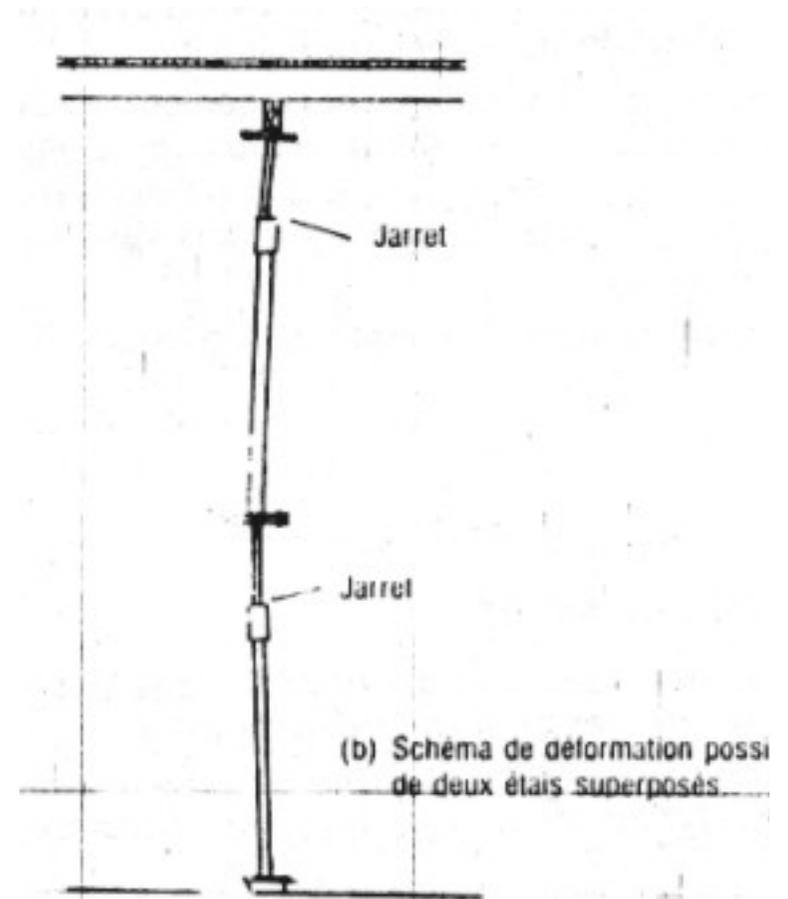
Ce plancher, le dernier à réaliser, se trouvait à 5,40 m de haut et le chef de chantier ne disposait que des étais télescopiques qui lui avaient servi pour les planchers courants de 3,0 m de haut. Il eut alors l'idée de les rabouter (assembler bout à bout).

Les étais avaient leurs platines percées de 6 trous, il suffisait donc de les assembler par 6 boulons – bien mince, il est vrai – pour former des étais de la hauteur voulue.



Mais, les deux parties d'un étau télescopique présentent entre elles un certain jeu qui forme jarret. En usage normal, ce jarret est situé non loin d'une extrémité et n'a pas d'effet notable sur les contraintes dans le tube. Dans ce cas, il y avait deux étais, donc deux jarrets et le chef de chantier, habitué à placer la rallonge en haut, avait superposé les pièces de telle sorte que le premier jarret était situé à peu près à mi-hauteur. L'ensemble pouvait prendre une cambrure dangereuse.

Ajoutés qu'en haut les rangées d'étais portaient des bastaings posées de chant (partie la plus étroite), en équilibre précaire, lesquels recevaient des cours perpendiculaires d'autres bastaings également de chant sur lesquels était enfin cloué le platelage. Sans aucun entretoisement, cette construction était un vrai château de cartes. Il a sans doute suffi du déversement de l'une des pièces pour que tout s'effondre.



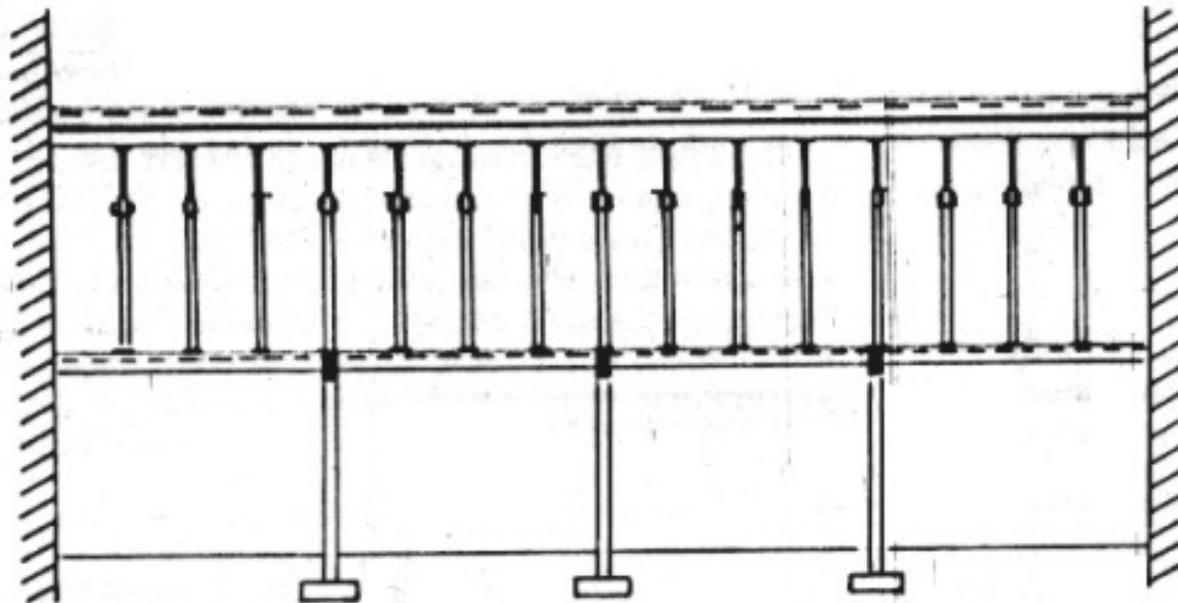
Moralité : On doit se méfier des idées originales.

Il est de bonne pratique de maintenir étayé le plancher intérieur si c'est lui que l'on sollicite. Il est conseillé aussi que les étais soient aussi superposés. Les ruptures des étais ou de leurs supports sont souvent graves de conséquences, car elles se produisent pendant le coulage du béton, lorsque les ouvriers travaillent en haut et les précipitent de la hauteur d'un étage au milieu du béton liquide et des armatures en désordre, ce qui peut leur causer des blessures graves.

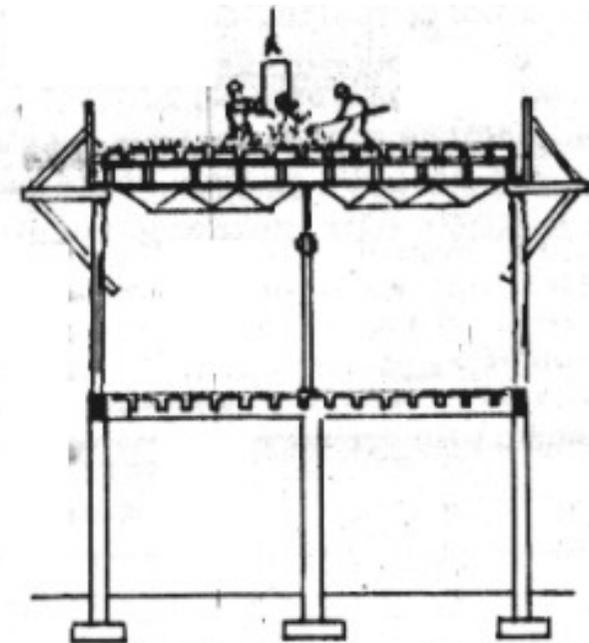
Exemple 17 : un plancher s'effondre en cours de coulage, le plancher sous-jacent s'étant lui-même rompu sous les étais. Deux morts.

Une entreprise employait depuis peu de temps des étais télescopiques horizontaux, ce qui lui offrait de grandes économies sur le nombre de ses étais verticaux. Ces derniers étaient donc moins nombreux et bien évidemment plus chargés.

Cette entreprise eut à réaliser un bâtiment scolaire de 9 x 23 m d'emprise à deux niveaux. Les planchers, à nervures parallèles aux façades, reposaient sur des poutres transversales espacées de 5,50 m. Pour étayer le plancher haut du premier étage, on avait disposé une seule file d'étais à mi-distance des façades et lancer des étais horizontaux télescopiques entre eux et les façades. Les étais reposaient sur le plancher haut du RDC par l'intermédiaire des semelles en bois répartissant la charge sur trois nervures du plancher.

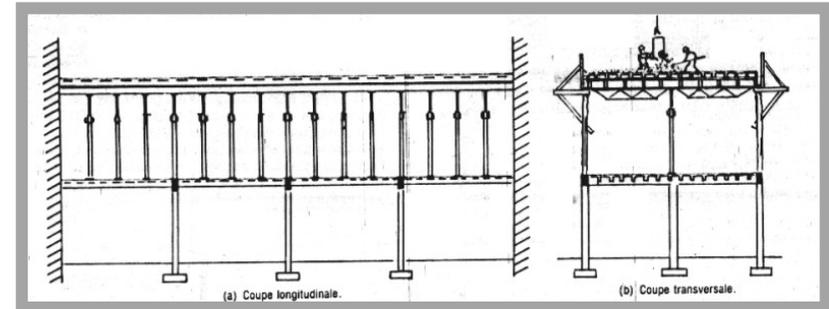


(a) Coupe longitudinale.



(b) Coupe transversale.

Causes : malgré la solidarité entre nervures assurée par la dalle coulée sur place et le soulagement partiel ainsi apporté



par les nervures encadrantes, les trois nervures directement sollicitées étaient incapables de soutenir la charge du plancher supérieure amenée par les étais. Quand la masse du béton coulé eut atteint la valeur qui devait provoquer la rupture, elles cédèrent, entraînant le coffrage, le plancher en cours d'exécution, les ouvriers bétonneurs et aussi les façades qui basculèrent et enfin le reste du plancher bas qui céda sous le poids des décombres.

Moralité : l'arrivée d'un nouveau matériel dans une entreprise doit toujours être accompagnée d'une formation du personnel qui aura à l'employer.

b., Fautes portant sur le ferrailage :

i., Armatures mal positionnées :

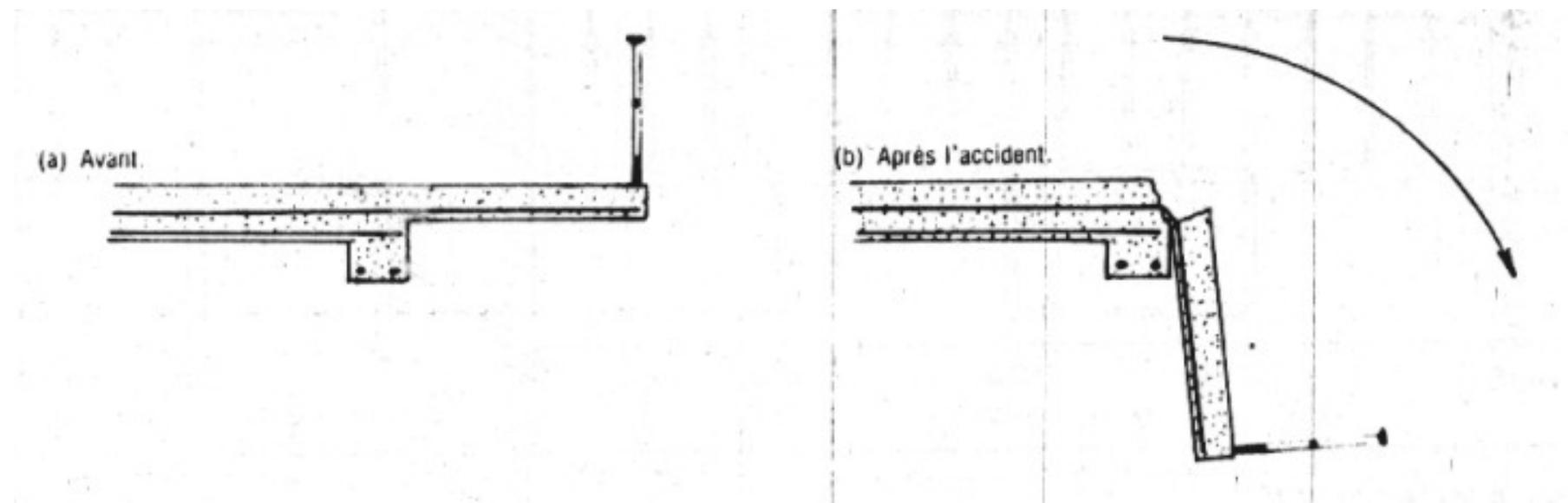
- *Armatures du mauvais côté* : il arrive que le ferrailleur place franchement les aciers du mauvais côté. Cela est arrivé plusieurs fois sur des balcons avec mort d'hommes ; c'est une faute impardonnable.

Exemple 18 : des balcons se rabattent le long de la façade précipitant dans le vide ceux qui s'y trouvaient.

Ce sont des cas connus et malheureusement nombreux :

- Tantôt ce sont des ouvriers qui travaillent au parachèvement de l'ouvrage et forment par leur poids –la charge d'essai-,
- Tantôt ce sont des curieux qui s'amuse sur le balcon pour voir quelque chose qui se passe dans la rue : accident, altercation, défilé, etc.

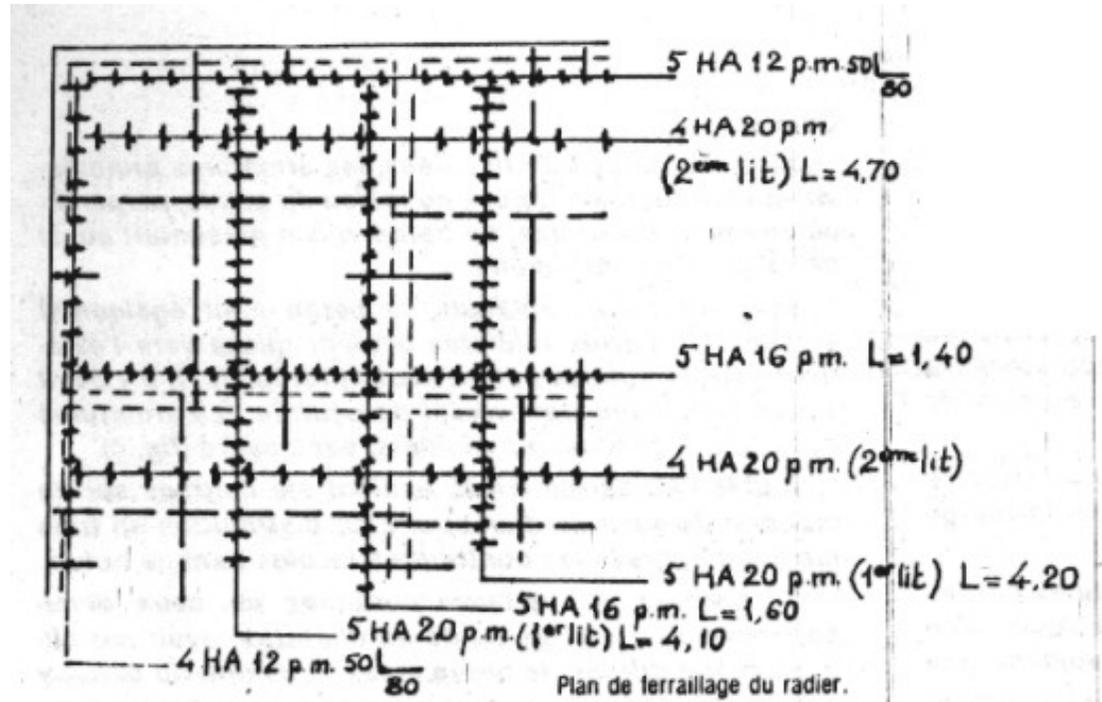
Dans tous les cas, les aciers étaient situés à 2 ou 3 cm de la sous face du balcon. Jusque là le balcon avait résisté grâce à résistance propre à la traction ; puis, la charge avait été trop forte et la section d'enracinement céda brusquement. Les aciers, formant alors charnière, font tourner la dalle et la maintiennent suspendue le long de la façade.



C'est arrivé aussi pour des radiers.

Exemple 19 : radier est ferrailé à l'envers. L'erreur est heureusement découverte avant bétonnage.

Il s'agit d'un immeuble résidentiel R+4 fondé sur un terrain sablonneux de qualité médiocre. Le radier est la première dalle que l'on réalise. C'est aussi, dans ce cas la première fois que l'entrepreneur travaille avec l'ingénieur qui a fait les plans.



Ces plans correctement dessinés, représentaient les nappes d'armatures selon les conventions usuelles qui différencient entre les aciers inférieures et supérieures. Comme le ferrailage était simple, aucune coupe ne permettait de repérer leur répartition dans l'épaisseur du radier.

L'entrepreneur (connaissait-il bien les conventions utilisées ?) crut de bonne foi que les aciers représentés en pointillés étaient les plus lointains, donc inférieurs, et les aciers en trait continu étaient bien apparents, c.à.d. ceux supérieurs. L'ingénieur vint au rendez-vous de chantier et découvrit immédiatement l'erreur. L'entrepreneur du recommencer le travail. Il ne perdit aucun acier : ses coupes étaient bonnes. Mais tout le monde avait eu chaud.

Moralité : c'est à juste raison que les règlements actuels prescrivent que "les barres des différents lits doivent être repérées sans ambiguïté" et qu'une "coupe type est nécessaire pour qu'il n'y ait pas d'erreurs d'interprétation sur l'appellation Premier lit et Deuxième lit.

- *Armatures trop à l'intérieur* : souvent, les aciers ne sont pas mis à leur place. Ceci est préjudiciable surtout quand la hauteur utile de la pièce est faible. On retrouve ces défauts dans les balcons, qui décidemment, sont des éléments à bien soigner. Ce mauvais positionnement est souvent causé par les ouvriers bétonneurs qui doivent marcher sur les armatures pour étaler et lisser le béton. Une bonne précaution pour éviter ce défaut est de prévoir des aciers de section suffisante et de les faire reposer sur des chaînages transversaux.



Poutre et chaînage de balcon assurant le maintien des armatures principales en place.

Exemple 20 : près de 2 km de balcons doivent être contrôlés, acier après acier, et renforcés en de nombreux endroits ; les barres principales n'étaient pas à leurs places.

C'était lors de la réalisation de grands ensembles, les défauts comme les qualités se retrouvaient répétées en série.

L'inspection du chantier révéla des fissures à la racine de certains balcons. Cela méritait attention et l'on demanda à l'organe de contrôle de rechercher au pachomètre la position des aciers principaux. Ces aciers étaient irrégulièrement placés dans la dalle ; certains se trouvaient à mi-épaisseur. Il fallait renforcer. On décida de creuser des saignées dans le balcon et dans la dalle arrière, sur une longueur totale de 1,50 m et de placer dans chacune d'elle une barre de renfort noyée dans un mortier additionnée d'une résine d'adhérence. L'absence de la façade non encore posée, facilitait le travail.

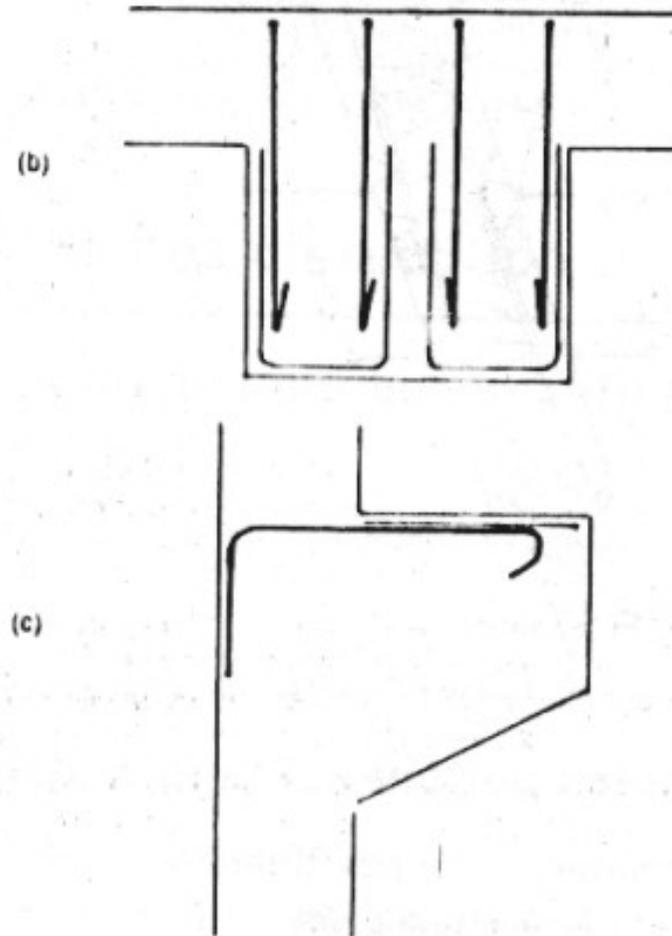
On s'est dit et à juste titre que ce défaut révélé en un endroit pouvait se retrouver ailleurs, encore masqué. Alors, on décida de passer au pachomètre les 2 km de balcons filants que comportaient les longues façades de ces bâtiments bandes. Il apparut que certains bâtiments étaient plus affectés que d'autres : il s'agissait des derniers construits, comme cela arrive fréquemment, l'attention des exécutants, de l'encadrement et des contrôleurs a tendance à la longue à se relâcher.

Recherches et renforcements prirent Trois (03) mois et retardèrent par voie de conséquence l'achèvement des immeubles et leur livraison aux futurs occupants.

Moralité : tous les aciers doivent être soigneusement disposés à l'emplacement prévu par les plans.

Un problème analogue concerne les corbeaux qui sont généralement bétonnés en deux phases :

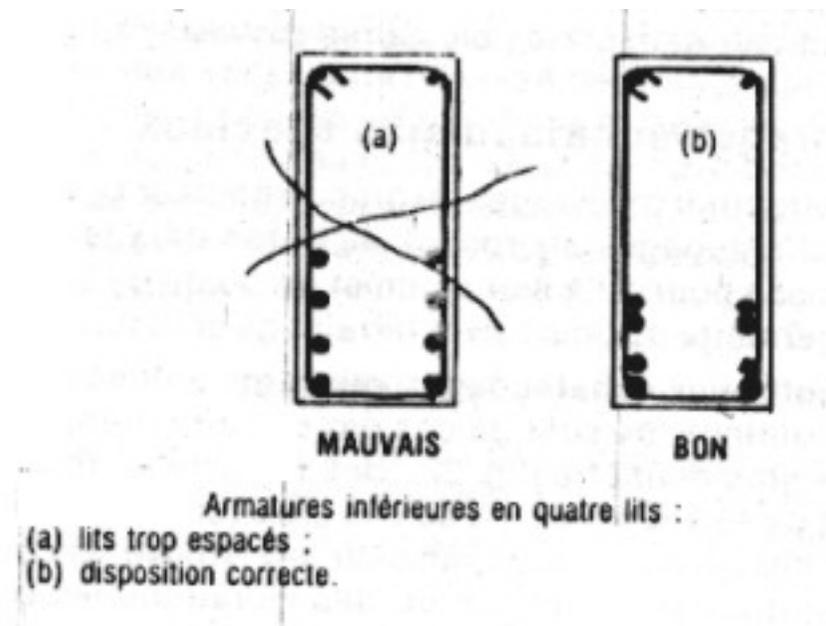
Quand on met en place les armatures d'ancrage, repliées dans le coffrage, on n'a aucun moyen simple pour vérifier si, une fois déployées, ces barres occuperont bien la position prévue au plan, jusqu'au nez de console et on ne le vérifie pas. C'est pourquoi il est toujours prudent d'ajouter des aciers en recouvrement sur les précédents et complétant le ferrailage.



Ferrailage d'un corbeau :
(a) coupe horizontale montrant les armatures principales repliées pour bétonnage du mur ;
(b) vue en plan de la console ; armatures principales (trop courtes) et épingles horizontales de couture ;
(c) coupe transversale.

- *Armatures trop à l'extérieur* : si l'enrobage des armatures est insuffisant, on peut voir apparaître :
A l'intérieur des bâtiments, des tâches de rouille visibles à travers le plâtre (très corrosif) ou l'endroit de revêtement,
A l'extérieur, des tâches de rouille suivies d'éclatements locaux du béton causés par le caractère expansif de l'oxyde ferrique.
C'est souvent le cas des zones fragiles et exposées telles que les nez de balcons, les larmiers d'acrotères. L'adhérence entre béton et armatures disparaît alors très vite et si la mise à nu d'une barre se situe dans une zone à fort effort tranchant, où le gradient de tension est élevé (près des appuis), il peut se produire un glissement de la barre ouvrant des fissures.

- *Lits de barres trop espacées* : on voit parfois espacer d'une manière inconsiderable les lits des barres principales des poutres sans prétexte d'assurer une meilleure adhérence. Cette précaution est illusoire et il convient de grouper les barres deux par deux.



- Recouvrements insuffisants ou trop concentrés : les recouvrements font intervenir, pour transmettre la charge, des bielles de compression dans le béton qui s'orientent en biais et doivent être contrebutés par des armatures de couture. La nécessité des recouvrements est bien connue. Y a-t-il encore des exceptions dans la profession ? Verra t-on des ferrailleurs découper leur aciers par petits bouts parce que le plan les avait représentés en pointillés ?

Exemple 21 : un plancher d'habitation se déforme progressivement après décoffrage. Les armatures ne se recouvraient pas. Il s'agit, d'un immeuble à étages, dont les planchers en dalles pleines de 18 cm armées de treillis soudés reposaient sur des refends espacés de 4 à 6 m. Après décoffrage du plancher-terrasse, on observa une déformation progressive accompagnée de fissuration dans l'une des travées de 5,60 m de portée.

Causes : c'était le dernier plancher réalisé et l'entreprise écoulait le reste de ses stocks de treillis soudés. Certaines inversions s'étaient produites dans le choix des panneaux et ceux restants n'étaient pas ceux prévus.

Les ferrailleurs avaient armé la travée de 5,60 m en raboutant au mieux : il y eut recouvrement vers le milieu de la portée et ce recouvrement interdit dans cette zone, n'était même pas de longueur suffisante.

Par bonheur, les façades espacées de 10,75 m constituaient des appuis secondaires permettant au plancher de se comporter en dalle reposant sur tout son pourtour. Cela évita l'effondrement pur et simple du plancher sur le précédent qui, sous la charge, ne serait pas non plus resté indemne. Il fallut réétayer d'urgence et creuser des saignées dans la dalle pour y ajouter les armatures de flexion nécessaires.

Moralité : les fins de chantier doivent être aussi soignées que le reste.

ii., Défauts de calage :

Les cales en plastique se sont substituées aux cales en mortier et ont conduit à certains problèmes, on cite :

Problème de fixation engendre leur décrochage. Elles tombent au fond du coffrage et apparaissent en peau du béton fini,
Placées en nombre insuffisant, elles causent en alternance avec le poids des ouvriers, un festonnage des armatures,
Dans les pièces étuvées, elles gonflent beaucoup à la chaleur pour se rétracter par la suite, entraînant des boursouflures en peau du béton apparent,
Elles n'offrent aucune adhérence au béton et les interfaces constituent des cheminements préférentiels au contact de l'eau, vers des points de corrosion prématurée des armatures.
Cela n'empêche pas les cales plastiques d'être une bonne solution économique en bâtiments courants.

c., Constitution, Fabrication et Coulage du béton :

La qualité des bétons dépend étroitement de ces opérations ; un résultat médiocre a un effet accélérateur sur la corrosion de l'acier et aggravation sur un sinistre.

i., Choix des constituants et composition : la composition du béton est comme une recette de cuisine ; le résultat ou le produit sera bon si les constituants sont de bonnes qualités et les proportions optimisées.

Les laboratoires spécialisés sont en mesure de réaliser les meilleurs mélanges en fonction des constituants présents, et ce en utilisant les adjuvants. Le problème se pose au niveau de la qualité des produits.

Le problème se pose au niveau de la qualité des produits. En effet, les carrières de granulats ne sont pas homogènes et les caractéristiques de ces composantes inertes sont sujettes à la variation.

Le ciment est réputé pour avoir une qualité constante. Il convient d'éviter les ciments de classe supérieure (55) quand leur utilisation n'est pas justifiée à cause du phénomène de retrait, plus important. Par ailleurs, il ne faut pas hésiter à prendre une qualité de ciment résistante aux milieux agressifs quand de besoin. De plus, le ciment ne doit pas être utilisé, ni encore chaud (insuffisamment ensilé) car il présente une prise irrégulière ni conservé trop longtemps en contact de l'humidité car il s'évente et perd ses qualités mécaniques.

L'eau est un paramètre extrêmement délicat. Quand l'emploi des adjuvants n'est pas justifié, on a tendance d'ajouter plus d'eau que prévu surtout si les granulats sont concassés. Le résultat est un béton trop liquide (soupe dans le jargon des chantiers). L'eau qui ne sert pas à l'hydratation du ciment s'évapore en créant, dans la masse du béton, un réseau de canalicules qui donne un béton peu compact et peu résistant. Un tel béton présente beaucoup de retrait et faïence en surface.

La pratique de la soupe est à proscrire pour les ouvrages d'étanchéité (réservoirs) ou dans les ouvrages de résistance (structures). Aussi, un béton faiblement résultant présente un faible module d'élasticité ; les déformations sous charge y sont plus grandes et peuvent accélérer les désordres dans les éléments portés.

L'utilisation des adjuvants (plastifiants, entraîneurs d'air) exige une maîtrise et des moyens. En effet, les produits utilisés sont actifs et s'emploient à faible dose. Ils nécessitent donc des dosages précis et un malaxage homogène ; ce qui n'est pas toujours obtenu sur les petits chantiers avec les bétonnières rudimentaires.

ii., malaxage : cette opération va du mélange à la pelle pour les petits travaux à la centrale automatisée pour le béton prêt à l'emploi (B.P.E.).

Il est évident que le malaxeur de type horizontal à palettes tournantes au sein du béton constitue un grand progrès relativement à la bétonnière basculante qui mélange par chutes répétées de masses de pâtes remontées par les palettes, ce qui l'aère au maximum.

La centrale à béton présente l'avantage de la fabrication de bétons aux formules les plus complexes et les plus composites (4 à 5 granulats, 1 ou 2 adjuvants, un E/L minimal en fonction de la teneur en eau des granulats et un minimum de ciment). Néanmoins, ces centrales robotisées présentent l'inconvénient du dérèglement et de la panne.

Ainsi le contrôle du béton devient une nécessité ; des essais d'écrasement sont réalisés quotidiennement, après durcissement accéléré par "thermo-maturation". De la sorte, un défaut est décelé dès le lendemain et s'il faut démolir, la quantité d'ouvrage affectée n'est pas trop importante.

iii., transport, coulage et vibration : le béton mis en place doit être homogène, compact et exempt de vides.

Transport et mise en oeuvre :

L'homogénéité implique, un malaxage suffisant et un transport qui n'aura pas provoqué de ségrégation (la toupie meilleure que la brouette, fût-elle motorisée), un coulage lent avec une hauteur de chute minimale (source de ségrégation).

Vibration :

La compacité est liée à la vibration. Cette opération est censée remplir tous les vides et notamment le contour des armatures (condition nécessaire à l'adhérence) et tente de chasser les bulles d'air en les faisant remonter à la surface. Aussi, cette opération reste délicate puisque le vibreur a tendance à repousser les gravillons qui rebondissent sur son corps comme des boules de billard et a tendance à attirer le mortier, par conséquent :

On doit vibrer toute la masse du béton de manière homogène sans excès à aucun endroit,

Ne pas vibrer les armatures puisque celles-ci vont transmettre les vibrations et repousseront les gravillons et s'entoureront d'une gaine de mortier dont l'adhérence est plus faible,

La vibration est arrêtée à un endroit quand le béton resseue, c.à.d. quand une fine pellicule d'eau remonte en surface.

Reprise de *bétonnage* :

Les reprises de bétonnage constituent toujours des zones faibles, soit pour les efforts obliques qu'elles doivent transmettre soit pour les efforts de traction où elles constituent des plans de fissuration privilégiés, soit pour l'étanchéité.

L'adhérence peut être améliorée en mouillant l'ancien béton et en badigeonnant la surface d'une résine appropriée (colle).

On doit réduire l'effet de paroi :

- par repiquage de l'ancien béton (création d'une surface rugueuse),

- en étalant sur l'ancien béton, une couche de mortier d'épaisseur égale à 1 à 2 cm additionnée de résine pour agir sur l'adhérence.

Cure du *béton* :

La cure du béton frais est accompagnée souvent par l'utilisation d'adjuvant (produit de cure) qui projeté à la surface, constitue une pellicule étanche empêchant la dessiccation prématurée des bétons exposés au soleil et au vent, sources de retrait et de faïençage.

Dans le cadre d'une reprise de béton ou l'application d'un enduit, il faut s'assurer que ce produit (ex. huile de décoffrage qui pénètre la peau du béton) ne nuit pas à l'adhérence.

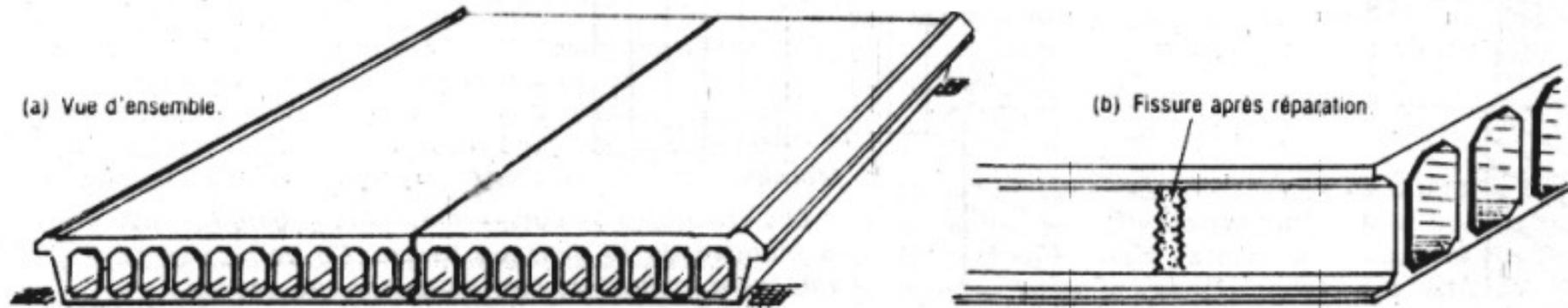
Si le béton reste brut de décoffrage, un changement de nature du produit de cure peut créer une hétérogénéité d'aspect durable de l'ouvrage sous l'effet de l'eau de pluie.

Effet du retrait différentiel :

C'est ce phénomène autant que les déformations thermiques, qui incite à découper par des joints rapprochés les éléments fragiles tels que balcons, acrotères, etc. De tels joints ne sont pas toujours compatibles avec la destination de l'ouvrage.

Exemple 22 : des fissures verticales apparaissent dans les âmes d'un pont route à caissons multiples.

Ce pont dont le plateau est de 25x33 m et 2,5 m d'épaisseur devait comporter une dalle formant membrane inférieure, 21 voiles verticaux formant âme multiple et une dalle constituant la membrane supérieure ; un joint de retrait était réservé entre le 10^e et le 11^e voile. Le bétonnage avait été logiquement prévu en trois phases : la dalle inférieure puis les voiles verticaux et enfin la dalle supérieure. Or, au décoffrage des voiles verticaux on y observa des fissures parfois importantes (jusqu'à 2 mm) que l'on jugea préjudiciables ; étant donné la destination de l'ouvrage qui devait présenter toute sécurité aux charges dynamiques et aux vibrations (passage de convois blindés).



Causes : l'ouvrage était important et le déroulement des travaux fût tel que le bétonnage des voiles n'intervint que plusieurs semaines après celui de la dalle inférieure. Ces voiles, de 33 m de long sans joint, étaient ainsi encastrés dans un béton qui avait déjà fait une grande partie de son retrait.

Les résistances requises étaient élevées et on avait utilisé un ciment encore chaud, dosé à 400 kg. C'était la fin d'un été chaud. Ces circonstances avaient provoqué un retrait différentiel important dans les voiles qui se trouvaient ainsi subir des contraintes horizontales de traction. De fait, toutes les fissures étaient verticales. L'un des voiles présentait une fissure de 2 mm d'ouverture vers le milieu de sa longueur, le suivant montrait six fissures réparties, de moindre largeur ; les autres voiles avaient des fissures filiformes.

Remèdes : on repique toutes les fissures de plus de 5/10 du mm pour réaliser des saignées à bordure en dents de scie et on y metta du mortier ; aujourd'hui, on aurait injecter des résines.

Moralité : les bétonnages en plusieurs phases doivent prévenir les conséquences du retrait différentiel lorsque la fissuration est préjudiciable.

Aujourd'hui encore, la difficulté de se procurer des ciments à faible retrait pose des problèmes quand il s'agit par exemple de raccorder les parois d'une cuve ou d'une piscine, coulées parfois à plusieurs semaines d'intervalle.

En élévation, on évite la fissuration d'un voile grâce au produit de cure et en réduisant au maximum les déphasages entre coulées (1 à 3 jours pour les réfrigérants, réalisés en coffrage grim pant ; coulage continu, avec seuls arrêts la nuit et les fins de semaines pour les silos, réservoirs et cheminées en coffrage glissant).

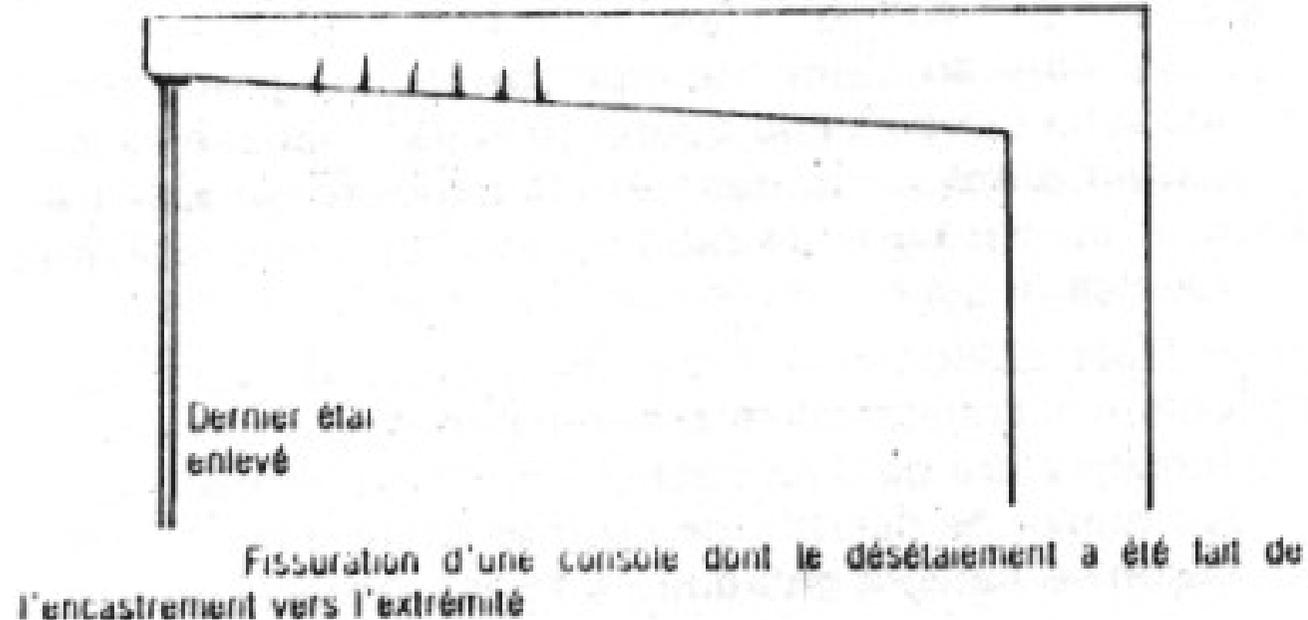
d., Désétalement, Décoffrage :

i., Délai : on ne doit évidemment décoffrer que lorsque le béton a acquis la résistance suffisante pour résister aux contraintes dues à son propre poids sans fluage. Le délai éminemment variable, constitue toujours un handicap dans le planning du chantier et l'entreprise succombe parfois à la tentation de décoffrer trop tôt. Le résultat en est un élément définitivement déformé.

La conservation d'éprouvettes de béton en œuvre et les essais de résistance au moment où l'on souhaite décoffrer sont les meilleurs moyens d'éviter les imprudences.

ii., Désétalement : le désétalement d'une grande pièce doit commencer par un débridage dans un ordre permettant à la pièce de travailler comme elle est conçue, cela afin d'éviter la fissuration du béton jeune.

Ainsi, les étais d'une console sont à desserrer en progressant du nez vers l'encastrement. Maintenir bridé l'étais d'extrémité le ferait travailler comme une poutre sur appuis simples, alors qu'elle n'est pas armée pour cela.

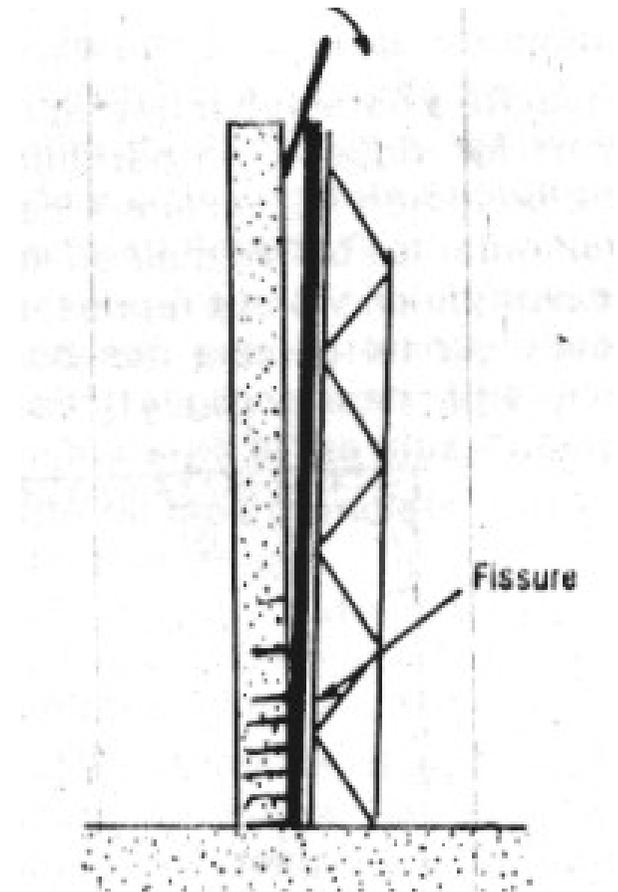


iii., Décintrement : le décintrement des grandes voûtes doit être, de même précédé par un débridage des étais, dès que le béton peut supporter son propre poids, pour permettre à la clé de descendre par suite du raccourcissement dû au retrait. Des étais de sécurité sont maintenus pendant que l'on procède au décoffrage. Ils seront recalés directement sous le béton après enlèvement du coffrage.

iv., Décoffrage : le décoffrage doit se faire sans exercer d'efforts parasites quand un panneau tend à rester collé. Souvent des fissurations sont provoquées par des ouvriers qui forcent avec des leviers pour aider au décoffrage.

e., Fautes diverses :

i., Ordre des opérations : la flexibilité de certains planchers d'habitation en dalle mince d'assez grande portée, conduit parfois à imposer un ordre de montage des cloisons. En effet, si elles sont réalisées en progressant étage par étage en montant, le fléchissement de chaque plancher met en charge la cloison sous jacente, laquelle reporte la charge sur le plancher qui la porte et sur la cloison d'en dessous et ainsi de suite jusqu'au premier plancher.

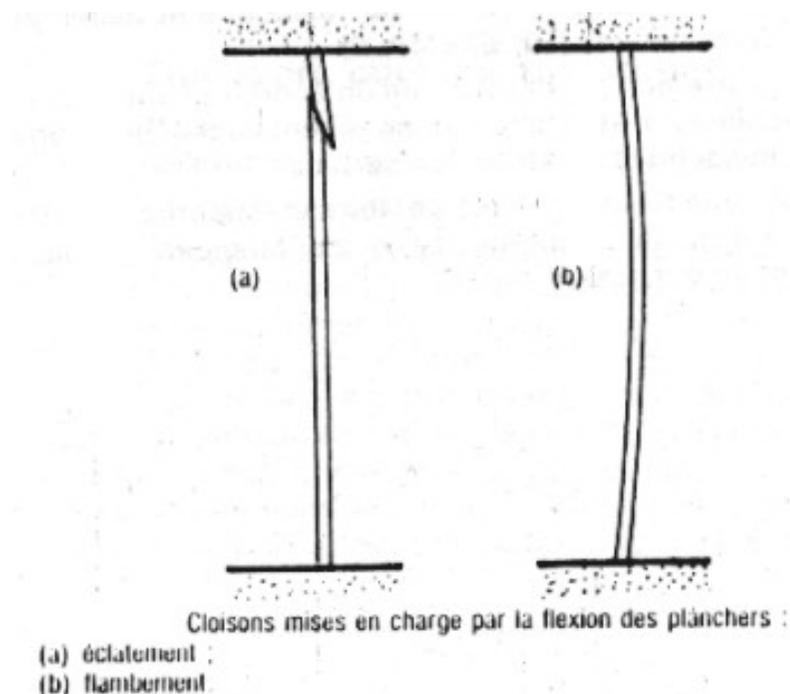


Comme les cloisons ne sont généralement pas capables de supporter ces charges, elles éclatent ou elles flambent. Pour éviter ces désordres, on peut :

- Soit monter les cloisons dans l'ordre de la descente des étages,
- Soit équiper un étage sur deux et attendre quelques semaines pour monter les cloisons des autres étages.

ii., Refouillements inconsidérés dans le gros œuvre : les ouvriers des corps d'état secondaires n'ont pas toujours conscience de la gravité de certaines de leurs interventions. On voit parfois :

- Des trous percés dans une poutre et des aciers coupés au chalumeau pour faire passer un tube de chauffage central, 81



- Des refouillements réalisés dans des poteaux de rez-de-chaussée pour sceller des vitrines ou des portes monumentales de part et d'autre, ce qui peut réduire dangereusement une section déjà limitée.
- Des empochements sur des balcons avec coupeuse des armatures de console, pour sceller un garde corps.

Ces affaiblissements de section du béton et, parfois d'armatures et les corrosions accélérées qui peuvent résulter des fissures provoquées par les coups de masse, peuvent mettre en péril jusqu'à la stabilité de l'ouvrage.

iii., Utilisation abusive de l'ouvrage par l'entrepreneur : les chantiers sont de plus en plus équipés d'engins motorisés capables de beaucoup de prouesses : circulation tout terrain, passage des obstacles, ascension ou descente de pentes raides. Selon leur poids, ces engins doivent être interdits dans telle ou telle zone du chantier

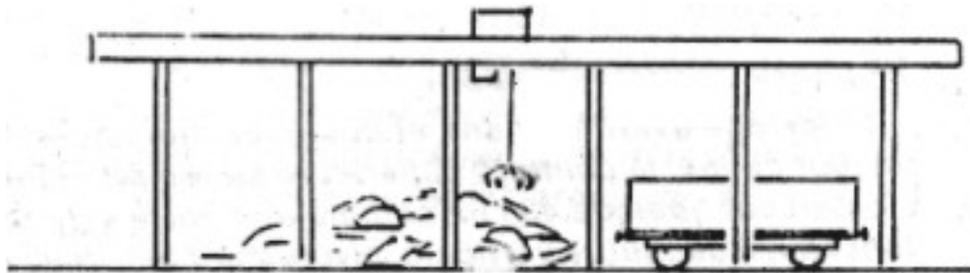
Exemple 23 : un plancher de garage se brise au passage d'un camion lourdement chargé.

Il s'agit d'un garage conçu pour ne recevoir que des voitures de tourisme. Dans l'organisation du chantier, il apparaît commode d'emprunter la dalle réalisée au niveau du sol pour la circulation des engins légers du chantier. Mais un jour un camion de 10 tonnes l'emprunta. La dalle ne s'effondra pas ; mais elle prit une telle flèche qu'il fallut la refaire. De même les pieds de poteaux ne sont pas des ancrages parfaitement sûrs et il peut être dangereux d'y accrocher un "tire fort" pour des efforts trop importants. Aussi, il arrive fréquemment que les planchers soient utilisés comme aires de stockage de matériaux ou de gravas. Ce peut être une source de fissures.

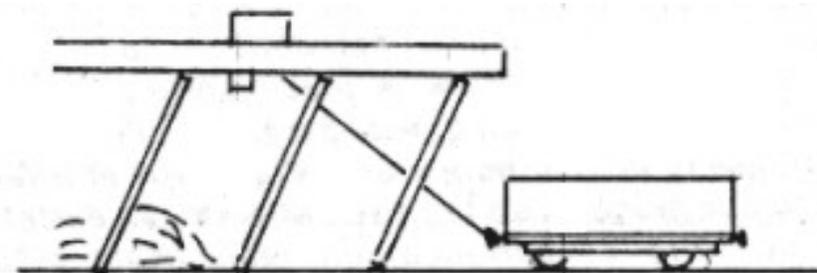
iv., Utilisation abusive de l'ouvrage par l'exploitant : l'exploitant, une fois réceptionné son ouvrage, doit faire bien observer par son personnel les astreintes d'exploitation sous peine de provoquer des désordres.

Exemple 24 : chemin de pont roulant s'affaisse : le grutier tirait un wagon avec son crochet.

Dans un parc à ferrailles, un pont roulant circulait sur deux portiques multiples en béton armé. Là aboutissait une voie ferrée et le poste avait pour fonction de charger les déchets de ferraille dans les wagons à l'aide d'un crochet équipé d'un électro-aimant.



(a) Vue longitudinale de l'installation.



(b) Affaissement de l'ouvrage, pendant que le pont tire un wagon.

Un jour, un wagon était avancé insuffisamment sous le portique à cause d'un encombrement inhabituel de la ferraille. Après avoir dégagé la place en chargeant la moitié du wagon accessible à son palan, il fallut avancer le wagon pour continuer le chargement.

Pour aller vite, le grutier déposa son électro-aimant, fit fixer son crochet à un tampon, bloqua ses galets de translation et tira en biais. Le wagon avança mais on entendit des craquements dans la structure en béton : elle n'était pas conçue pour un tel effort. Elle s'était déformée dangereusement et elle commençait à s'affaisser.

5.6. Vieillesse.

i., Action de l'eau sur le béton durci :

Le béton est sensible à l'eau pure et aux eaux acides : l'eau pure est très avide de sels. Si elle s'infiltré dans le béton, elle va y dissoudre les composés instables, comme c'est le cas de la chaux libre dégagée lors de l'hydratation du silicate tricalcique du ciment (alite) ou originelle par suite d'une mauvaise cuisson et rendre le matériau poreux.

Exemple 25 : la voûte couvrant un atelier se désagrège lentement en intrados et menace de s'effondrer. L'eau de pluie est en cause.

Cette voûte n'était recouverte d'aucune protection (étanchéité) et recevait directement les eaux de pluie.

Peu à peu des efflorescences et des stalactites blanchâtres apparurent. L'eau qui traversait le béton dissociait lentement la chaux libre résiduelle du ciment puis s'évaporait en intrados en déposant des sels calcaires.

Bientôt des morceaux de béton tombèrent sur le personnel et les machines. Les armatures de la voûte couvertes de rouille, apparaissaient par endroits. Elles faisaient peu à peu éclater le béton. On se hâta de fermer l'atelier, de réparer la voûte et de la couvrir d'une étanchéité multicouche.

Les eaux acides, comme les eaux sulfureuses abondantes en atmosphère urbaine et dans certains terrains où l'eau de mer, attaquent aussi, cette fois par réactions chimiques, les constituants basiques des ciments ordinaires.

Parfois ce sont les vapeurs agressives émanant de produits de fabrication qui se mélangeant à l'eau de pluie retombent sur l'ouvrage.

Exemple 26 : la voûte couvrant un atelier subit des attaques graves en extradors et menace de s'effondrer.

De l'atelier s'échappaient des vapeurs chlorées. Cette voûte n'était couverte d'aucune protection.

L'atelier comportait un poste de décapage de pièce d'acier dans l'acide chlorhydrique "HCl". Les vapeurs chlorées étaient aspirées par un ventilateur et renvoyées par des gaines débouchant au dessus de la voûte. Quand il pleuvait, les vapeurs chlorées étaient dissoutes par l'eau de pluie qui tombant sur la voûte, attaquait le béton.

Au bout de quelques mois, de larges zones de la voûte laissaient apparaître les granulats à moitié saillants, le mortier d'enrobage ayant complètement disparu.

On se hâta de réparer, on décapa les zones attaquées pour neutraliser les imprégnations acides. On vaporisa une résine d'accrochage et l'on projeta à la lance un mortier qui reconstitua l'épaisseur manquante.

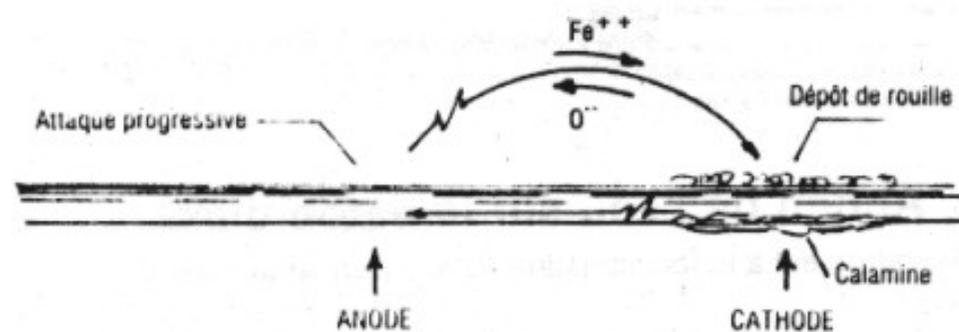
ii., Action de l'eau sur les armatures :

Si l'acier dans le béton armé, compense la fragilité du béton à la traction, le béton lui, compense la fragilité de l'acier à la corrosion : il le protège en le couvrant d'une couche passivante. Au début, cette couche est formée par les alkalis du clinker et des ajouts (cendres ou pouzzolanes), puis la chaux prend le relais par la formation en surface de ferrite de chaux. Mais si les armatures ont été mal décalaminées, cet équilibre peut être rompu par simple action du CO_2 ou O_2 de l'air en milieu humide, sans aucun apport chimique.

Il suffit pour cela qu'une fissure ouverte livre passage à ces gaz :

- Le premier sous forme d'acide carbonique 'CO', dépassive l'acier,
- Le second entretient un courant de micro pile entre zones de l'armature à des potentiels différents. En effet, la présence de calamine adhérente augmente quelque peu le potentiel électrique naturel du fer.

Les zones calaminées forment des cathodes et les zones voisines deviennent des anodes ; les atomes de fer passent lentement de l'anode à la cathode, véhiculés par l'eau et l'oxygène sous forme d'hydroxydes, tandis que la barre d'acier constitue le conducteur extérieur de la pile. L'attaque est ainsi continue dans les zones anodiques, tandis que la rouille se dépose dans les zones cathodiques et rien ne peut arrêter le phénomène tant que s'entretient la présence d'O₂ et d'H₂O.



Attaque électrolytique d'un acier mal décalaminé en présence d'oxygène et d'humidité.

La présence d'un électrolyte dilué (HCl ou H₂SO₄) accélère encore le phénomène, c'est la raison pour laquelle on tend à proscrire les adjuvants à base de chlorure de calcium surtout si les aciers sont constitués de petits diamètres.

iii., Action des produits chimiques sur le béton armé :

Il arrive parfois, dans les usines employant des produits chimiques, que des bacs débordent ou comportent des fuites de produits agressifs (saumure, chlorure, sulfate, etc.).

Ces attaques n'épargnent pas les constructions agricoles (urines dans les étables, acide lactiques dans les laiteries).

Elles peuvent décomposer les granulats s'il s'agit d'un calcaire tendre ; mais elles décomposent surtout les composants du ciment durci. Si le ciment durci contient trop de célite, il peut former par agression sulfurique le sel de Candlot, composé expansif, qui disloque la cohésion du béton.

Pour y pallier, on utilise les ciments aux ajouts (laitier de haut fourneau, cendres volantes ou pouzzolaniques) qui forment en durcissant des silico-aluminates de chaux insensibles aux sulfates qui d'une part obturent les fissures et passivent les armatures.

iv., Corrosion intercrystalline et fissurante de l'acier :

La corrosion intercrystalline est une attaque des interfaces entre cristaux de certains aciers alliés. Elle devient fissurante sous contraintes excessives. Ces corrosions sont redoutables, surtout pour le béton précontraint et présentent rarement des effets dommageables pour le béton armé.

5.7. Conclusion.

La durabilité d'un ouvrage en béton armé est liée à une qualité de construction sans faille. C'est une chaîne qui part du concepteur qui doit connaître les limites du matériau, passe par le calculateur qui doit connaître les règles de dimensionnement

et s'intéresser à l'élaboration de plans allant au détail de toutes les opérations de fabrication et de réalisation. Elle touche ensuite tous les corps de métiers : coffreur, ferrailleur, bétonnier, personnel de chantier qui doivent chacun en prendre soin jusqu'à la réception par l'utilisateur qui doit l'entretenir par des opérations de maintenance.

Si l'un des maillons de la chaîne est défaillant, la chaîne est alors défaillante. Ainsi, l'imperfection de plusieurs maillons a ici un effet cumulatif.

Les sinistres enregistrés montrent qu'ils sont la conséquence de la synergie de plusieurs défaillances (au moins deux) d'origines indépendantes.

La robustesse et l'adaptabilité du béton armé pardonne généralement une à deux défaillances ; il ne cède finalement que sous la gravité ou l'abondance des mauvaises actions que lui font subir ses constructeurs.