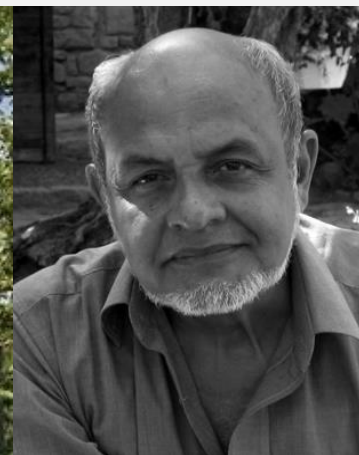


TD : **STRUCTURE 1**

CYCLE LICENCE S3/S4

Marc LEYRAL – Sylvain EBODE

D'après un TD de M. POIRIER et R. ARLOT



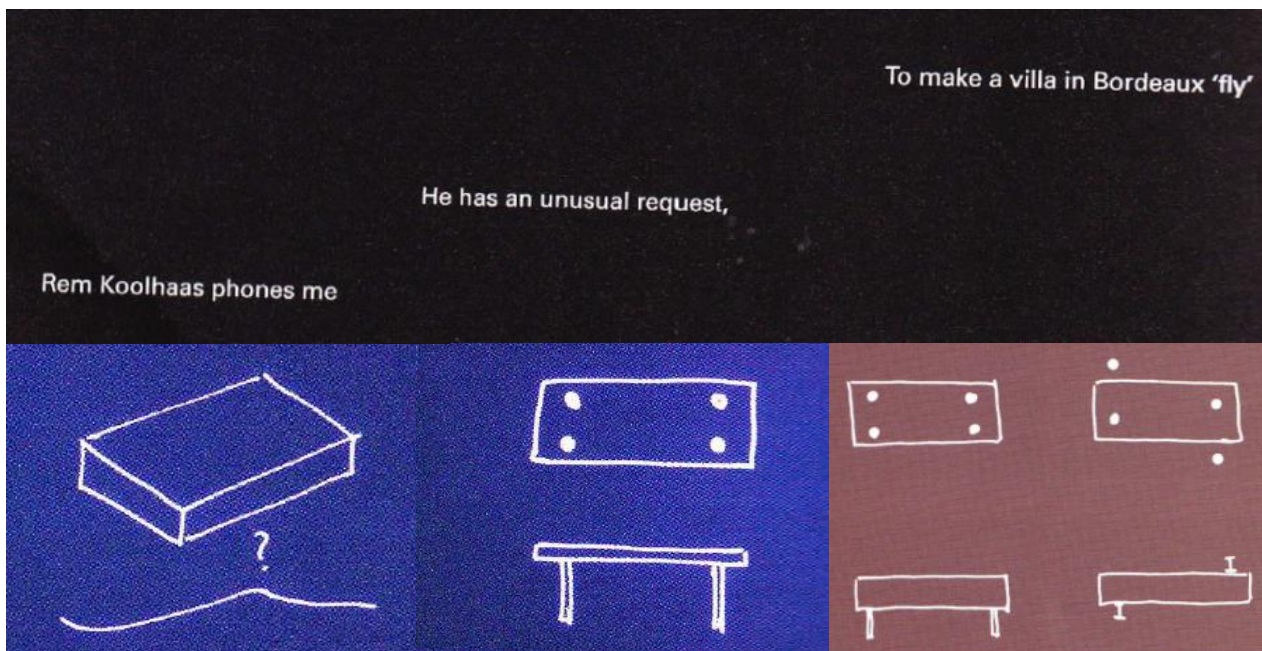
S1-TD2

TD THÉORIQUE : ANALYSE D'UNE STRUCTURE

*La Villa Lemoine ou Maison de Bordeaux
Arch. Rem Koolhaas et Ing. Cecil Balmond*

Sommaire du cours

INTRODUCTION	1-3
1. SCHÉMA STATIQUE	1-4
1.1 Caractérisation des éléments structurels	1-4
1.1.1 Les éléments de reprise et de distribution	1-4
1.1.2 Les porteurs	1-6
1.2 Caractérisation des appuis et des liaisons	1-8
1.3 Compréhension et choix des matériaux	1-16
1.3.1 Modes de fonctionnement	1-16
1.3.2 Modes de rupture	1-17
2. DESCENTE DE CHARGES	2-20
2.1 Calcul des chargements	2-20
2.1.1 Les types de charges :	2-20
2.1.2 La classification des charges :	2-20
2.1.3 Les Etats Limites :	2-20
2.2 Principe fondamental de la statique	2-21
2.2.1 Enoncé du P.F.S.	2-21
2.2.1 Descente de charges	2-21
3. LE VENT ET LE CONTREVENTEMENT	3-27
3.1 Principes théoriques des écoulements d'air	3-27
3.2 Principes de calculs du vent	3-28
3.3 Principes de contreventement	3-31



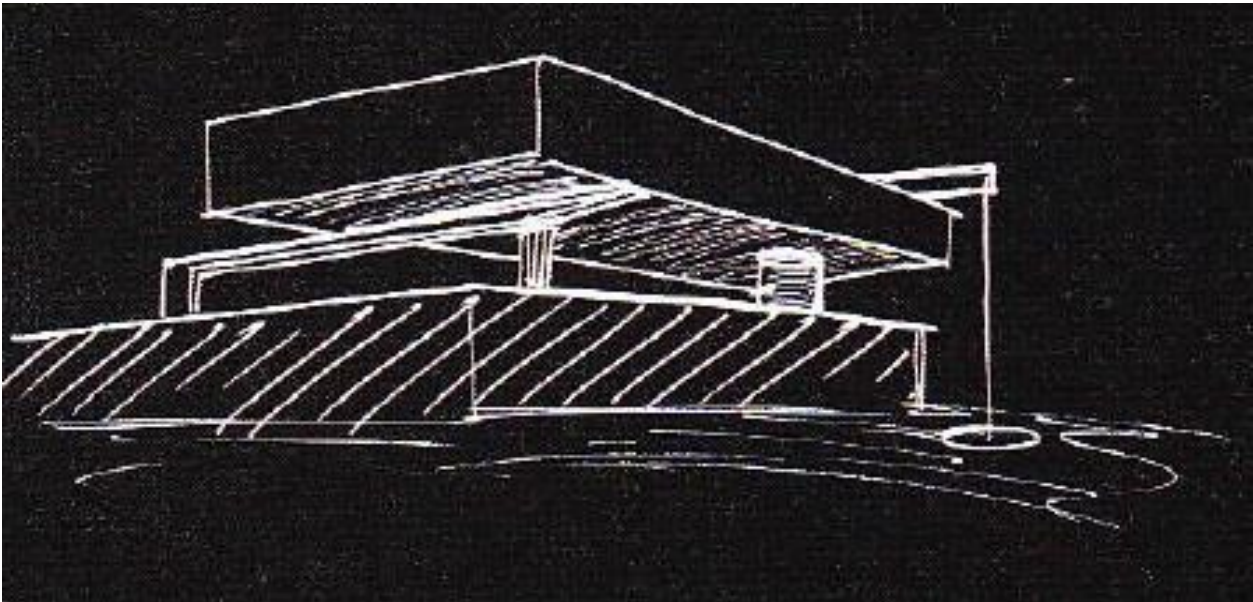
Introduction

L'objet de ce TD est d'expliquer le plus clairement et, surtout, le plus intuitivement possible le cheminement d'une bonne analyse d'une structure.

La science des structures appartient au domaine des sciences de la mécanique et s'appuie principalement sur deux branches : la statique et la résistance des matériaux. Il s'agit de sciences très anciennes pour lesquelles un formalisme et un cheminement de pensée clair et récurrent a été développé.

Ce cheminement sert de base systématique aux analyses de structures, même les plus détaillées. Ce TD a pour objectif de le présenter en l'illustrant d'un exemple célèbre : la Villa Lemoine, ou Maison de Bordeaux, de Rem Koolhaas et Cecil Balmond. Le TD expliquera les principaux raisonnements de base de la statique. Certaines notions de résistance des matériaux seront également présentées de façon pédagogique bien qu'il ne s'agisse pas de l'axe principal du TD.

L'objectif de ce TD est enfin d'aborder les principes d'équilibre des structures le de façon la plus naturelle possible en reléguant leur expression purement mathématique au second plan. Il est en effet de peu d'intérêt de faire du calcul pour faire du calcul alors que la transcription mathématique des phénomènes vient presque naturellement une fois que leur compréhension physique est bien maîtrisée. C'est d'ailleurs ce schéma qu'a historiquement suivi l'évolution de la statique des structures : d'abord est venu le déchiffrement logique avec, par exemple, les travaux de Simon Stevin (1548-1620), puis, dans un second temps, les premiers formalismes et les premières transcriptions mathématiques (Newton, un siècle plus tard et les méthodes modernes de calculs discrétisés essentiellement entre 1800 et 1900).



1. Schéma statique

1.1 Caractérisation des éléments structurels

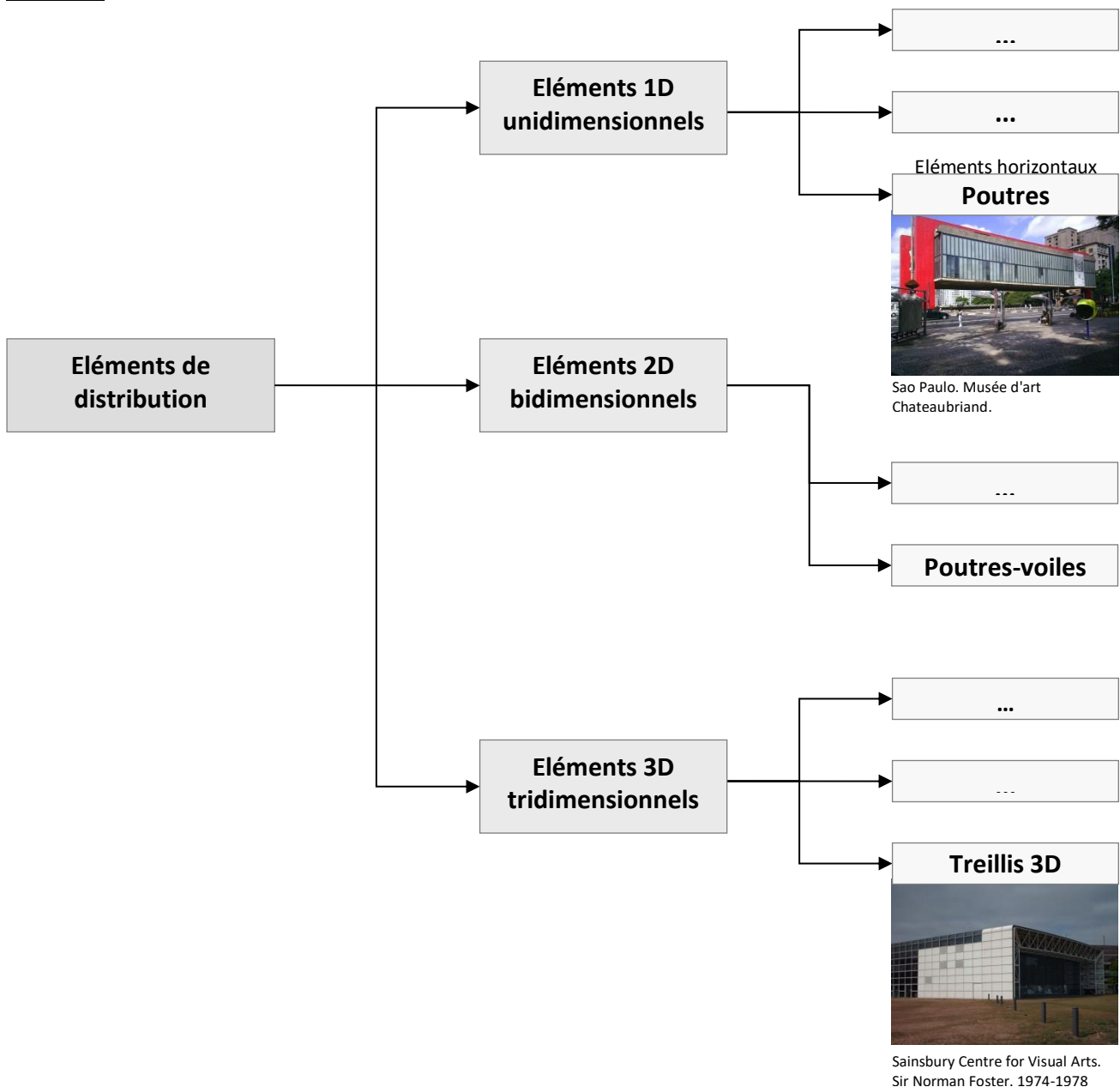
1.1.1 Les éléments de reprise et de distribution

Définition : en structure, les éléments de reprise et de distribution sont plus ou moins **horizontaux** et ont pour rôle est de **distribuer les charges sur les porteurs**.

Caractérisation : en simplifiant, nous pouvons considérer que ces éléments sont **unidimensionnels** (= barres : ex. poutres), plus rarement bidimensionnels (poutres-voiles), et encore plus rarement tridimensionnels (treillis 3D) qui travaillent essentiellement en **flexion**.

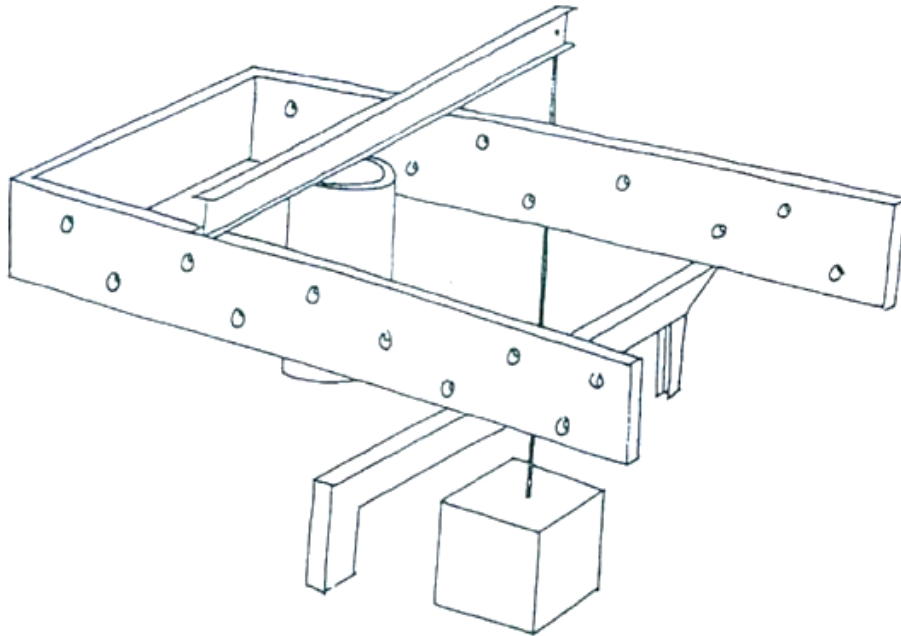
Classification : on propose une classification géométrique dont le schéma est donné ci-dessous.

A retenir :

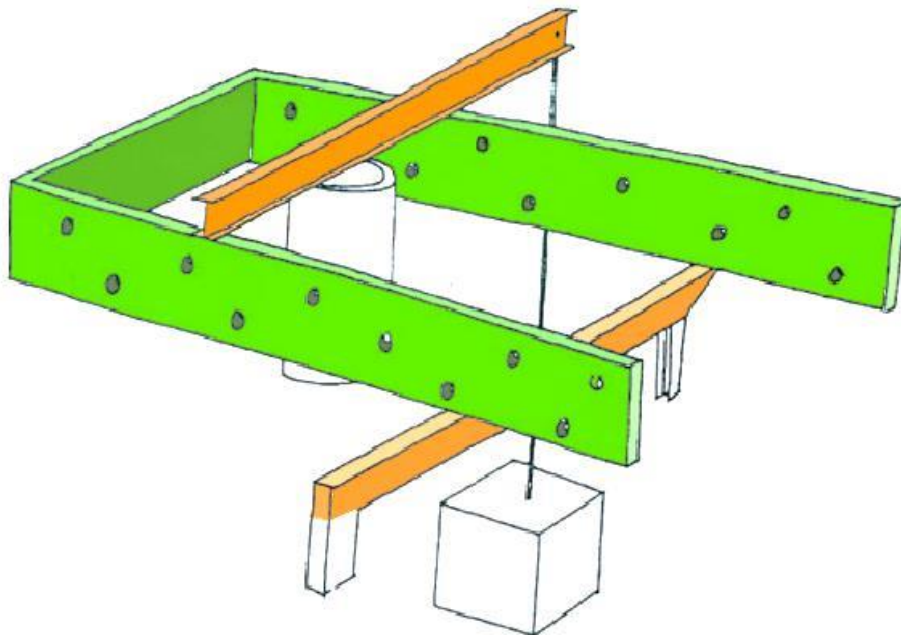


TD 1 : ANALYSE D'UNE STRUCTURE : VILLA LEMOINE

Question 1 : à partir de ces définitions, identifier les éléments de reprise et de distribution des charges de la Villa Lemoine et les classer.



Solution :



Poutres



Poutres-voiles

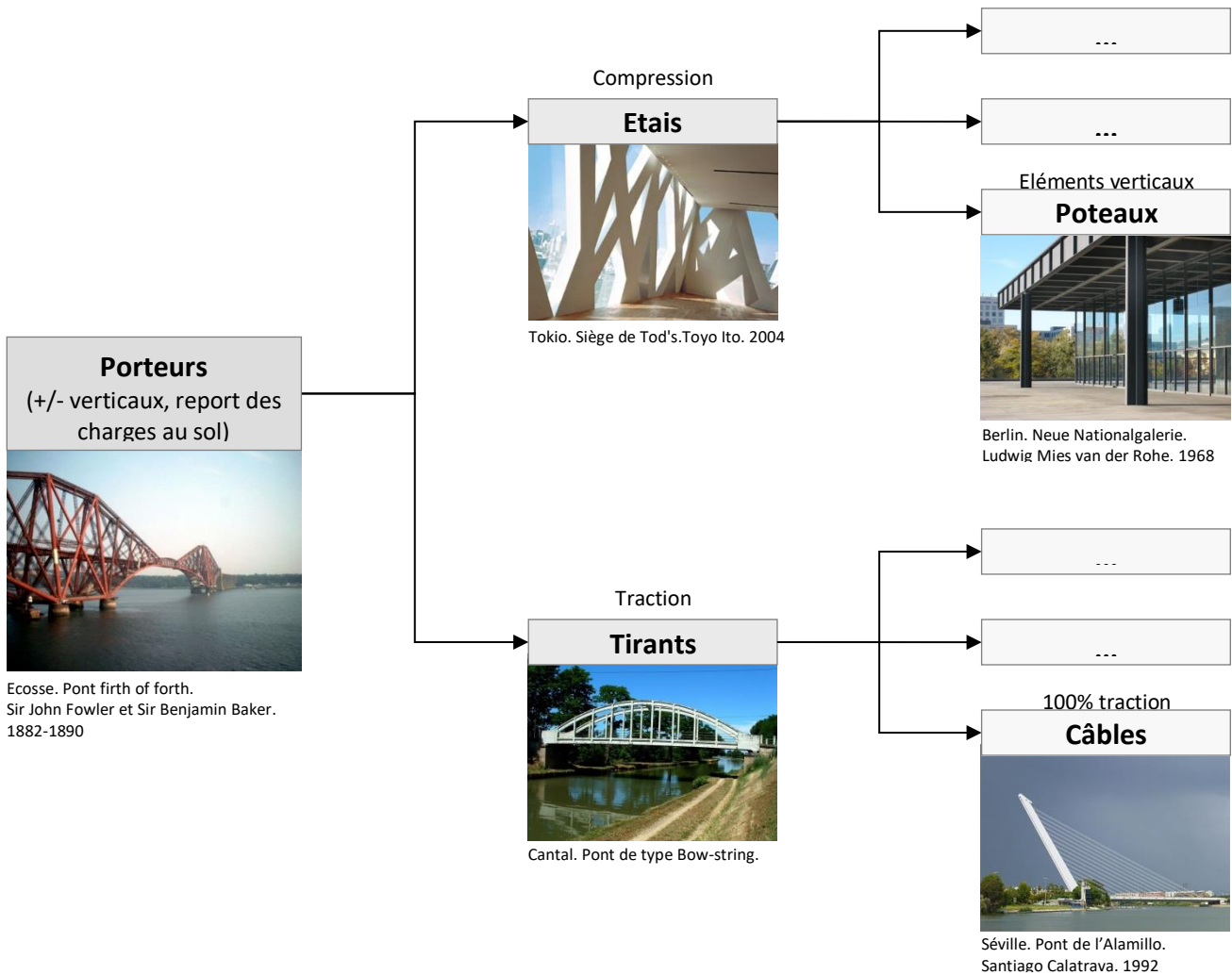
1.1.2 Les porteurs

Définition : en structure, les porteurs sont des éléments plus ou moins **verticaux** dont le rôle est de **descendre les charges vers le sol**.

Caractérisation : en simplifiant, nous pouvons considérer que les porteurs sont des **éléments unidimensionnels** (= barres : ex. poteaux) ou bidimensionnels (pour les voiles) qui travaillent essentiellement en **traction** et en **compression**.

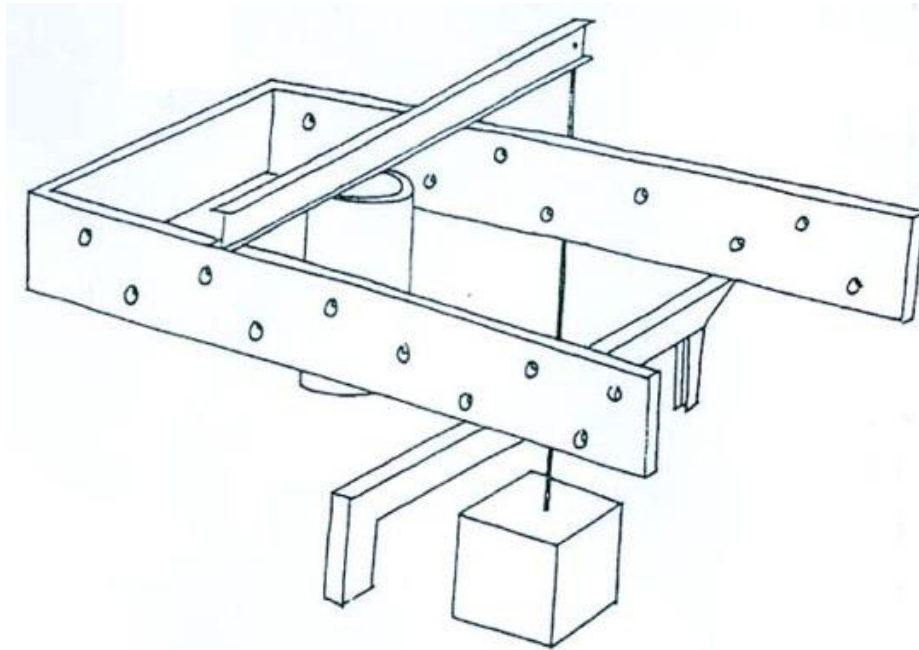
Classification : les porteurs peuvent être divisés en deux catégories selon le mode de fonctionnement : les **étais** qui travaillent en compression, et les **tirants** qui travaillent en traction. Les étais verticaux sont appelés **poteaux** et constituent, de par leur simplicité théorique et constructive, les porteurs les plus courants en architecture. Parmi les tirants, nous pouvons citer les **câbles** qui ont la particularité de ne jamais pouvoir travailler en compression, même minime : il s'agit des tirants les plus « purs » du point de vue théorique, en contraste avec les barres très fines qui pourraient reprendre quelques petits efforts de compression.

A retenir (en se concentrant sur les porteurs unidimensionnels) :

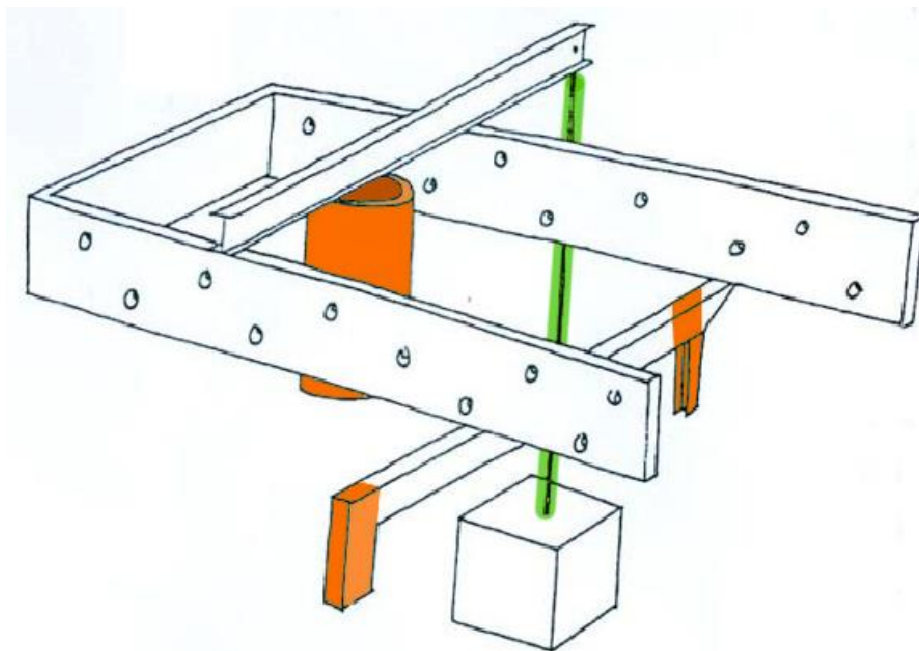


TD 1 : ANALYSE D'UNE STRUCTURE : VILLA LEMOINE

Question 1 : à partir de ces définitions, identifier les porteurs de la Villa Lemoine et les classifier.



Solution :



 Poteaux

 Tirants

1.2 Caractérisation des appuis et des liaisons

Il existe plusieurs types d'appuis et de liaisons en architecture. Le choix des appuis aura une grande importance sur la répartition des efforts dans la structure. Par exemple, un appui qui laisse libre la rotation ne transmettra pas de moment tandis qu'un encastrement transmettra tous les efforts d'un élément à un autre. Le choix de l'appui peut donc dépendre du matériau des éléments et de leur mode de fonctionnement.

On définit par **degré de liberté** un mouvement relatif d'un élément par rapport à un autre. Il existe 6 degrés de liberté dans l'espace : 3 en **translation** (selon les trois directions x , y et z) de l'espace, et trois en **rotation**.

Les appuis peuvent laisser libre ou bloquer des degrés de liberté. On peut en déduire une classification des appuis en architecture :

DDL	Type de DDL	Nom	Représentation	Réalisation	Exemple
5	Translations en plan et toutes rotations possibles	Appuis simple			
3	Toutes rotations possibles	Rotule			
1	Une rotation possible	Pivot Nb : en 2D (problème plan) Pivot = Rotule			
1	Une translation possible	Glissière			
0	Aucune rotation et aucune translation possible	Encastrement			

Il existe bien entendu de nombreux autres appuis possibles en mécanique, en jouant sur d'autres combinaisons de degrés de liberté (ex. : hélicoïdal). Ceux présentés ici sont les plus courants en architecture.

Cependant, dans le calcul des structures, il est plus facile et plus habituel de travailler en 2 dimensions (cadre d'une feuille de dessin)

Dans le plan, en deux dimensions, il n'y a que trois degrés de liberté possibles : deux translations dans le plan de la feuille de dessin et une rotation dans le plan. Ainsi les appuis et liaisons deviennent :


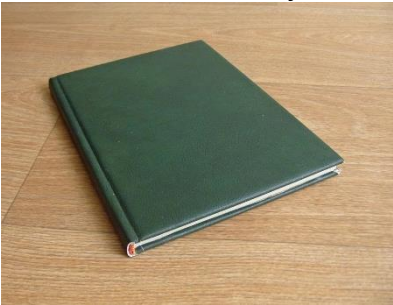

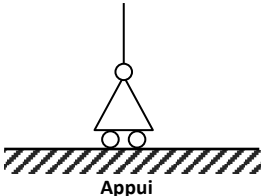
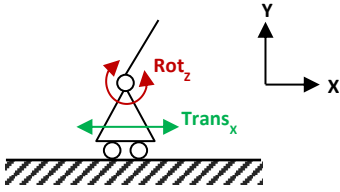
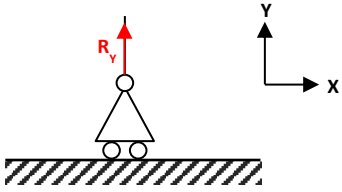
Nous en outre que :

- Une **force** produit une **translation**
- Un **moment** produit une **rotation**




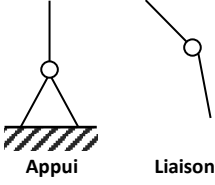
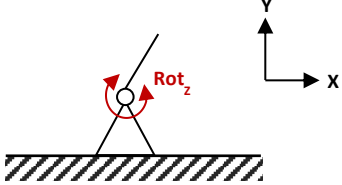
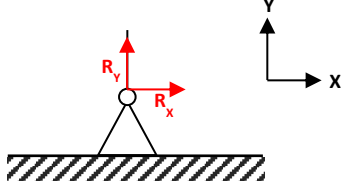
Donc si un appui bloque une translation, cela veut dire que la force qui induisait la translation a été neutralisée : c'est dû à l'apparition au niveau de l'appui d'une force appelée **réaction**. Elle est de même grandeur que l'action mais de sens opposé.

De même, quand un appui comme un encastrement bloque une rotation provoquée par un moment, cela veut dire qu'il agit sur la structure en imposant un moment d'encastrement en réaction de même valeur et de sens opposé.




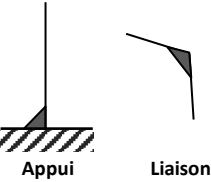
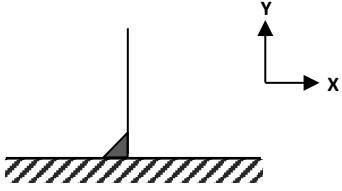
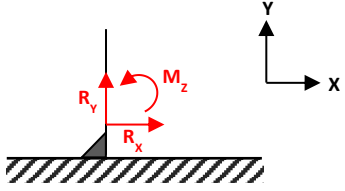
Ainsi pour chaque appui on associe des réactions possibles :

L'Appui simple ou Appui glissant		
Avec les mains	Dans la vie de tous les jours	Dans le monde des structures
		
Représentation	DDL : 1 translation + 1 rotation	1 Réaction en force = 1 inconnue
 Appui		

La Rotule ou Articulation

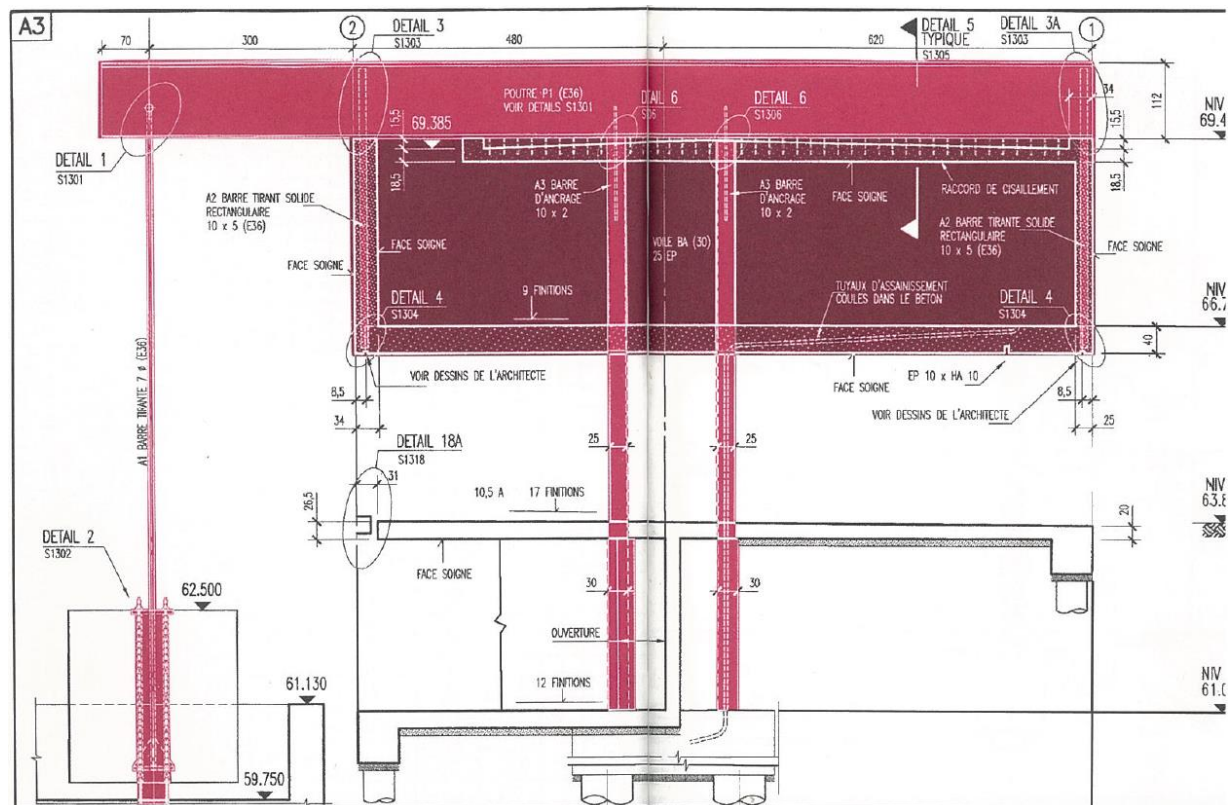
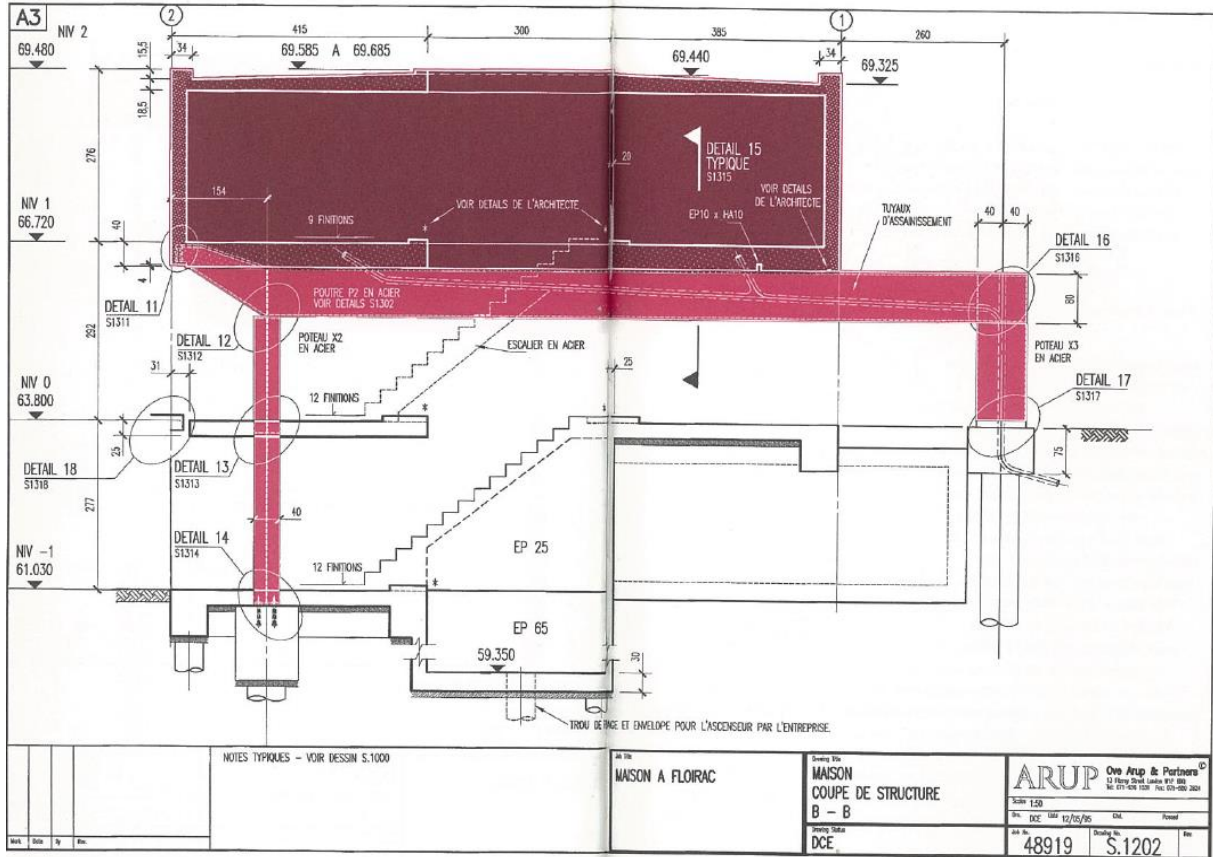
<p>Avec les mains</p> 	<p>Dans la vie de tous les jours</p> 	<p>Dans le monde des structures</p> 
<p>Représentation</p> 	<p>DDL : 1 rotation</p> 	<p>2 Réactions en force = 2 inconnues</p> 

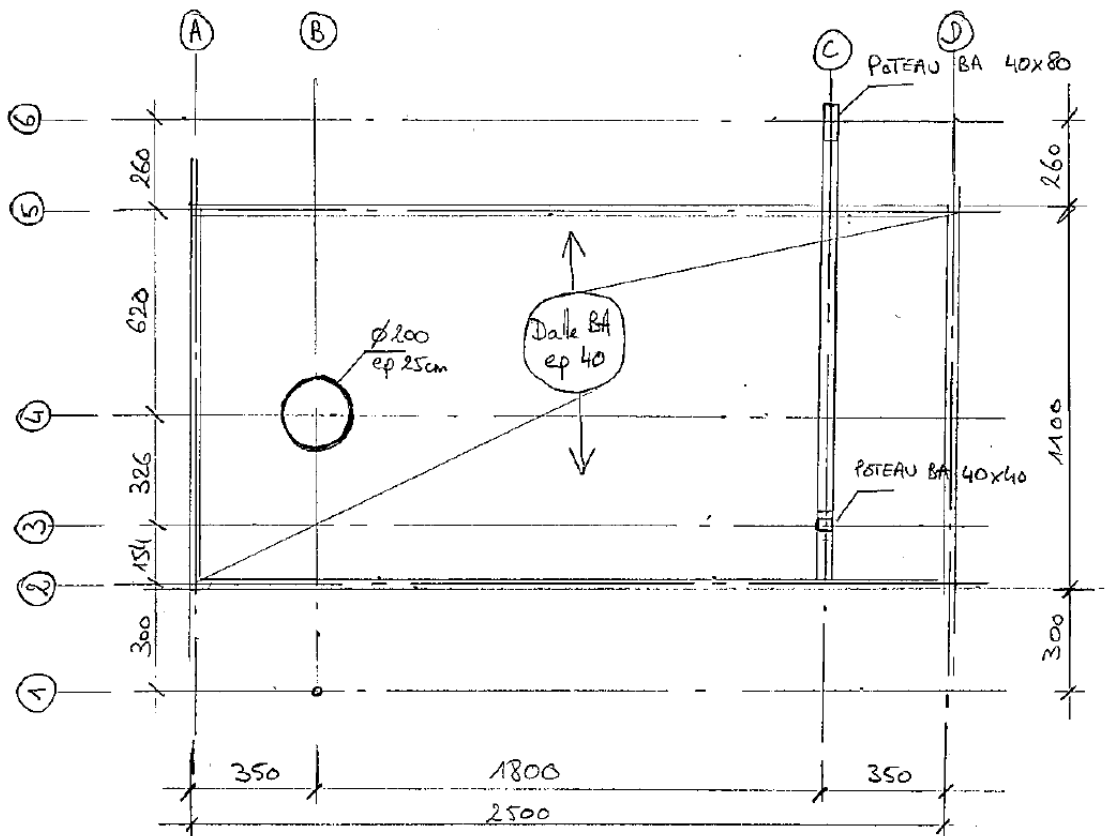
L'Encastrement

<p>Avec les mains</p> 	<p>Dans la vie de tous les jours</p> 	<p>Dans le monde des structures</p> 
<p>Représentation</p> 	<p>DDL : aucun</p> 	<p>2 Réactions en force + 1 Réaction en moment = 3 inconnues</p> 

TD 1 : ANALYSE D'UNE STRUCTURE : VILLA LEMOINE

Question 3 : à partir des détails des appuis et des liaisons de la Maison à Bordeaux donnés ci-dessous, identifier les différentes catégories de liaisons. Tracer le schéma statique de la file 1, et des files B et C. Les justifier.

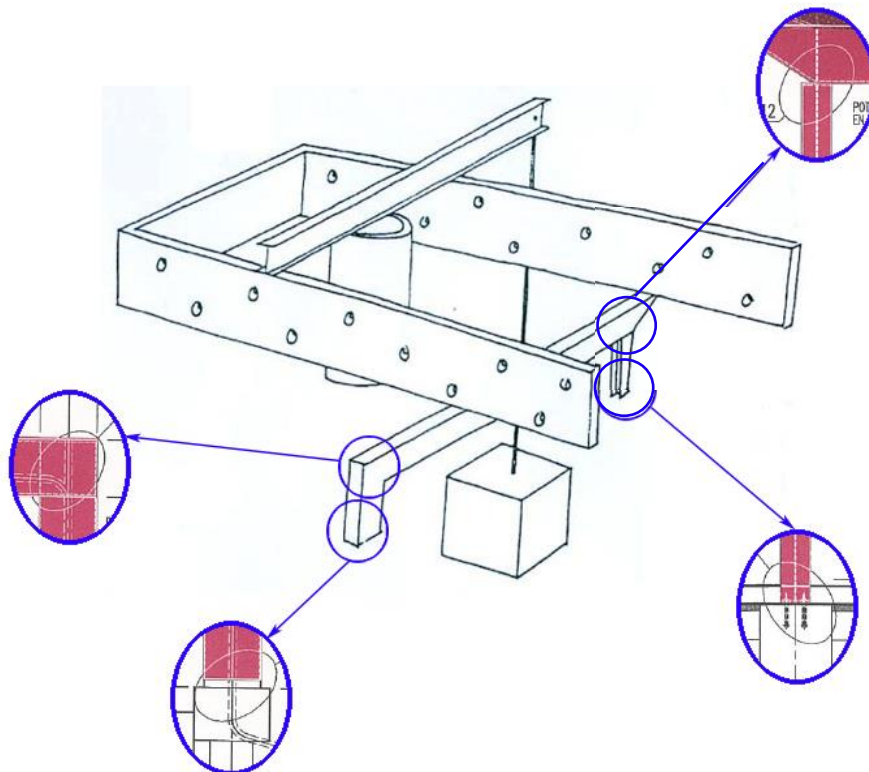




NOTA: L' ENSEMBLE DES MURS PÉRIPHÉRIQUES FONT 25 cm D'ÉPAISSEUR .

Solution :

FILE PORTEUSE C



FILE PORTEUSE C

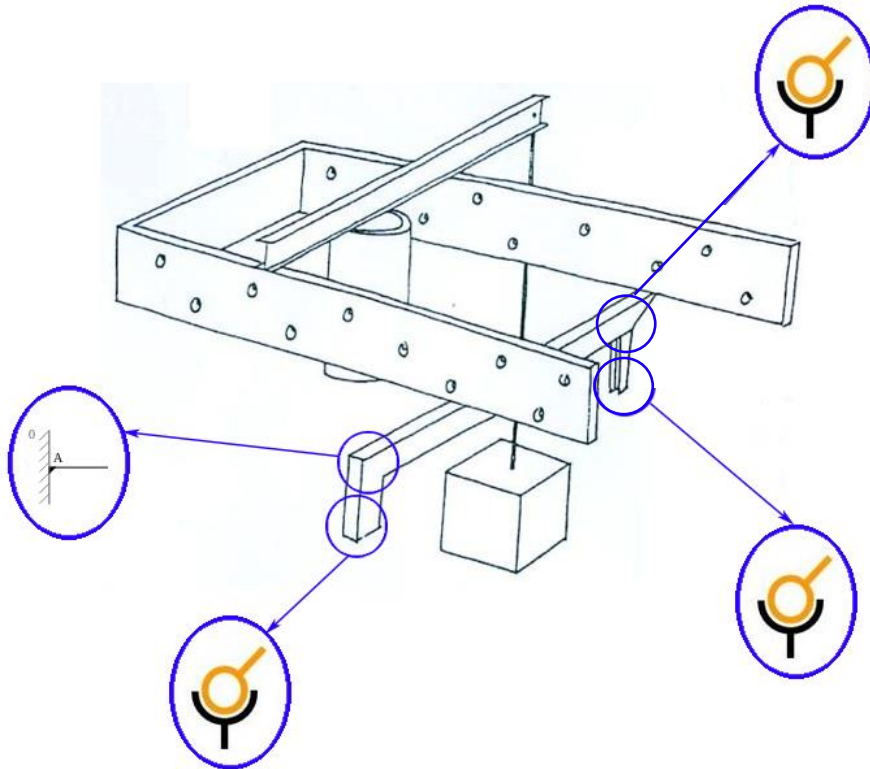
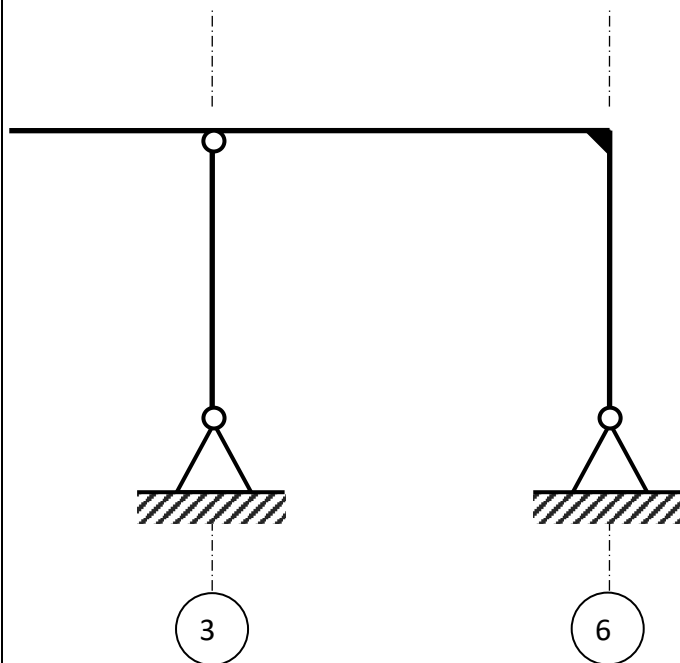
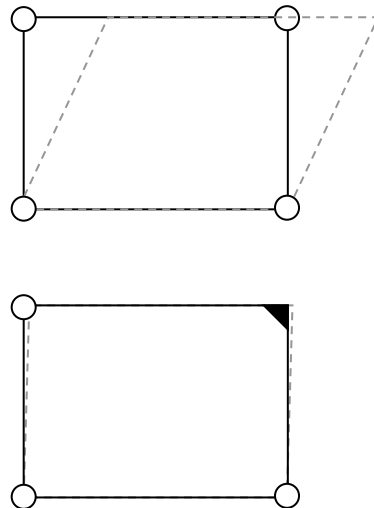


Schéma statique de la file porteuse C :



L'encastrement permet de bloquer la possible déformation géométrique en parallélogramme (contreventement) sous une force horizontale



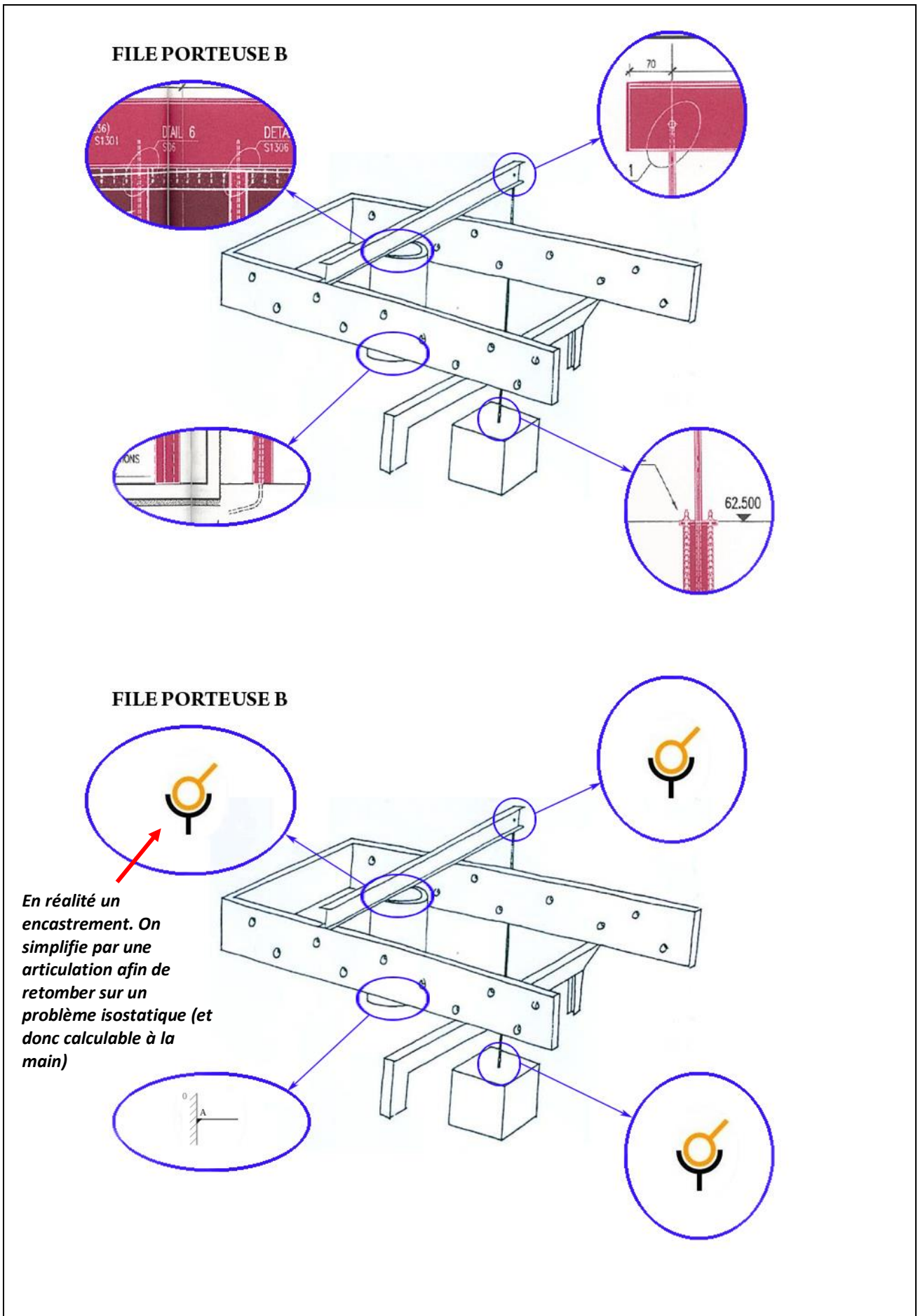
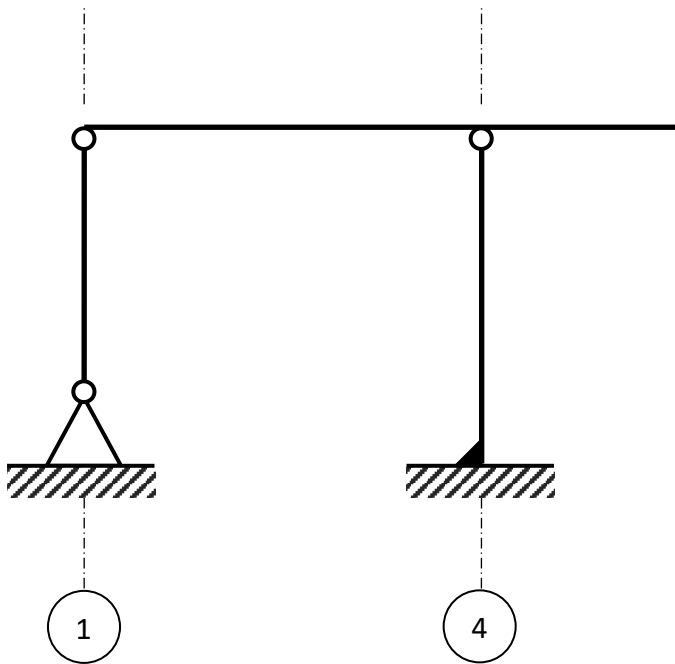
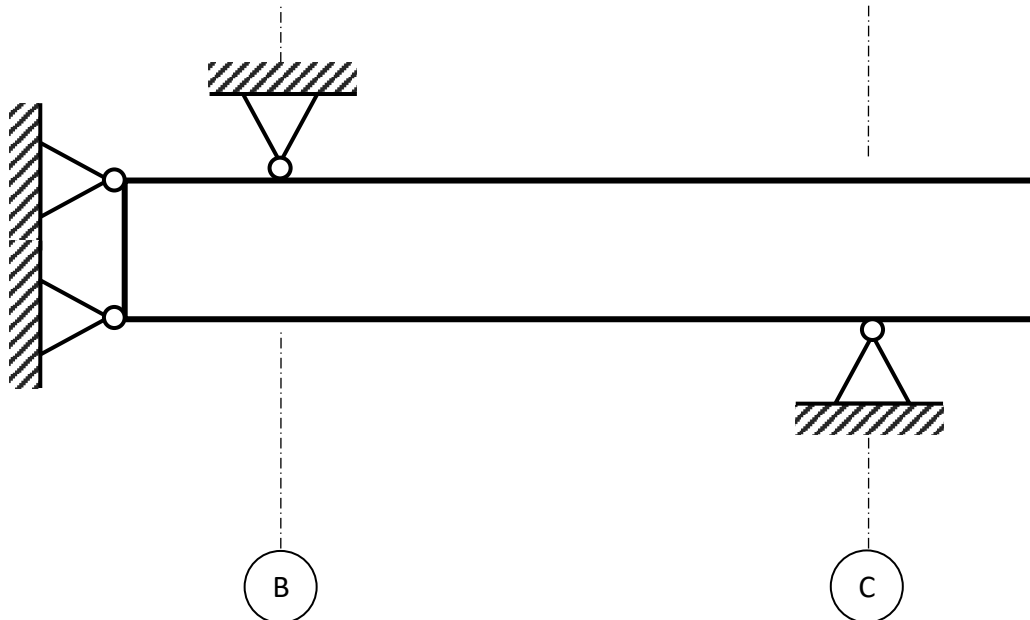


Schéma statique de la file porteuse B :



L'encastrement se fait dans les deux sens.
Il permet de lutter contre les déformations
du vent. Nous le verrons dans le détail en
troisième partie.

Schéma statique des files 1 et 5 :

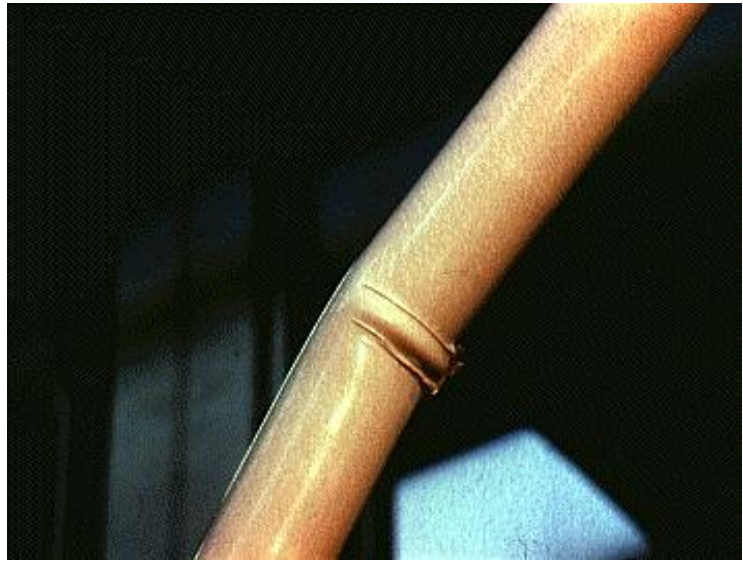


1.3 Compréhension et choix des matériaux

1.3.1 Modes de fonctionnement

En général, les matériaux travaillent (c'est-à-dire résistent) plutôt bien à la compression (comme c'est le cas pour le béton). Certains, tels les principaux métaux, résistent bien à la traction. En revanche, des matériaux comme le béton ou la pierre tiennent mal à la traction :

L'acier travaille très bien à la traction : un câble de seulement 4mm de rayon supportera sans peine une charge d'une tonne (soit l'équivalent d'un béluga adulte). L'acier, lourd et assez cher, est donc souvent utilisé en élément fin. Dans ce cas, il risque de se ruiner (généralement par rotule plastique après flambement) s'il est mis en compression.



Le béton, au contraire, travaille très bien en compression car peu cher, il est utilisé en sections larges. En traction, il résiste très mal, comme le montre la photo ci-dessous d'un bloc de béton brise-vague, ruiné par la traction de son propre poids.

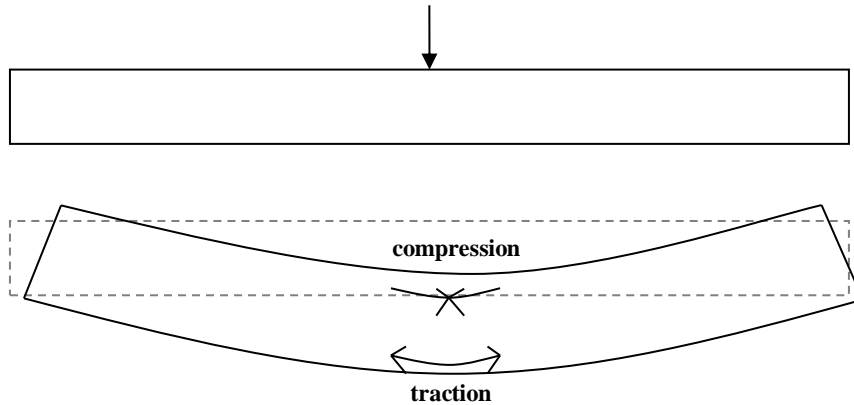


1.3.2 Modes de rupture

Il est généralement admis que la flexion est le mode de fonctionnement le plus critique pour les matériaux.

On a en effet vu que le béton résiste mal à la traction et que l'acier fin risque de flamber en compression.

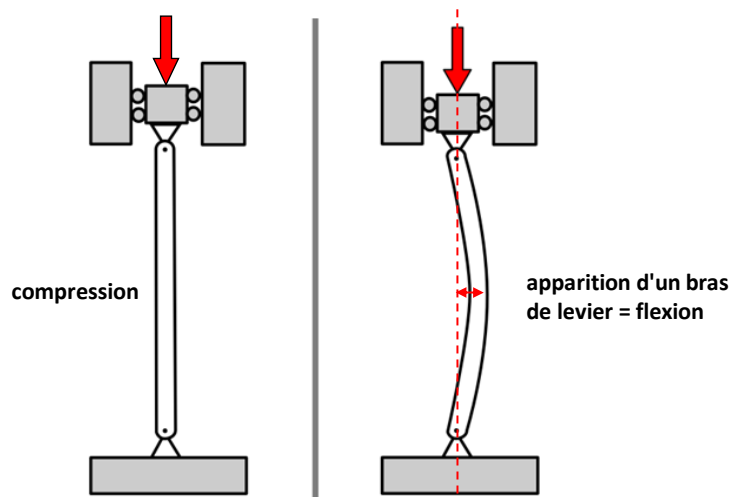
Or il résulte de la flexion d'un élément qu'une partie sera en traction **et** l'autre en compression. La flexion simple d'un élément induira donc souvent un mode de fonctionnement critique pour les matériaux.



Pour briser un bâton, il n'est en effet pas intuitif de tirer sur les bouts. Tout le monde aura tendance à empoigner le bâton et à le fléchir.

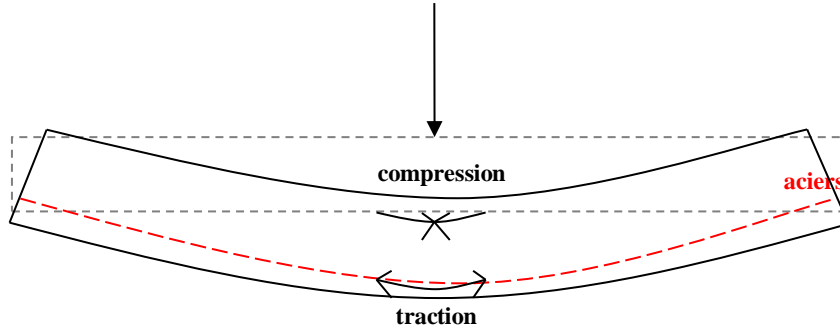


La nature utilise le même "raisonnement" : lorsqu'un élément est sollicité en compression, il existe une valeur critique de la force de compression après laquelle l'élément se retrouve naturellement en état d'instabilité. Il va alors chercher un autre état stable en se courbant, ce qui demande moins d'énergie. Mais ce qui induit également un bras de levier et transforme ainsi l'effort de compression en effort de flexion : c'est le **flambement**.

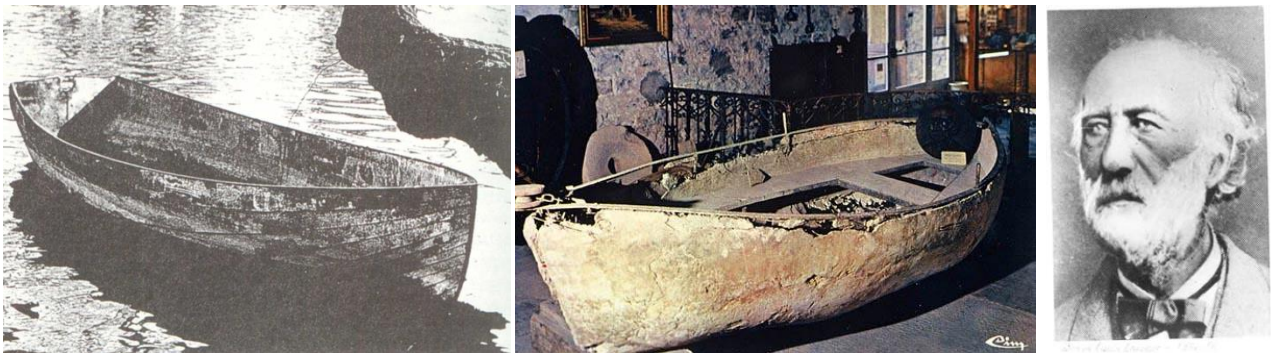


Les éléments de distribution des charges, comme les poutres, fonctionnent souvent en flexion. Ils sont donc soumis au mode de fonctionnement le plus critique. Ils doivent ainsi être dimensionnés en fonction.

La première solution consiste à mélanger un élément résistant à la compression, tel le béton, avec un matériau résistant à la traction, comme l'acier. On obtient dans ce cas le béton armé. On fera attention à bien placer les aciers dans les zones sollicitées en traction.



La première utilisation du béton armé remonte à Joseph-Louis Lambot qui fabriqua une barque en béton armé de fer pour son lac en 1849. En 1855 il déposera un brevet sous le nom de *ferciment*.



La deuxième solution consiste à utiliser une poutre treillis. C'est une solution ingénieuse qui permet de décomposer la flexion globale en compressions et en tractions localement dans chaque élément. Ce dispositif est l'objet du TD2.

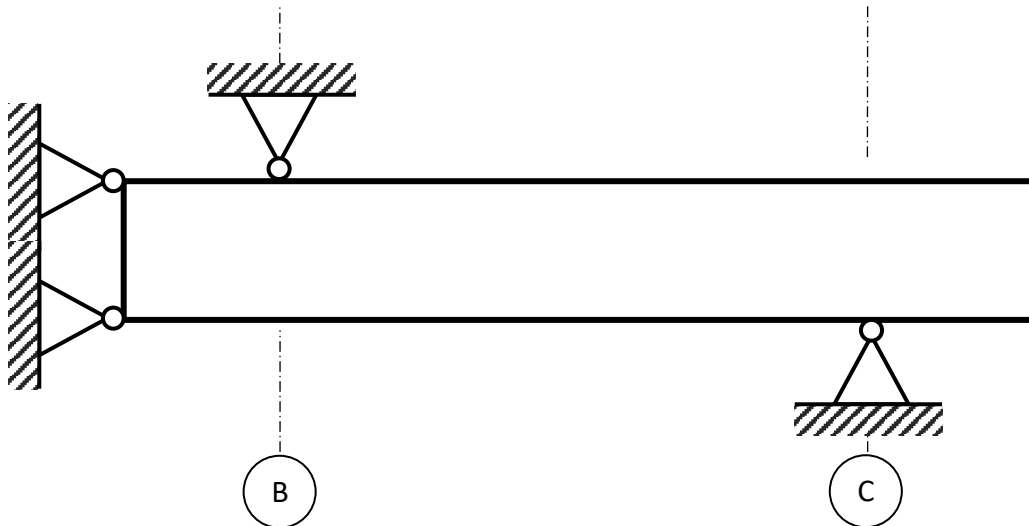


TD 1 : ANALYSE D'UNE STRUCTURE : VILLA LEMOINE

Question 4 : en quel matériaux réaliseriez-vous une poutre-voile comme celles de la Villa Lemoine ? Justifiez votre choix.

Réponse : Le schéma statique ci-dessous contre met en évidence que le voile est en flexion et subit des efforts tranchants, notamment à ses appuis : il subira à la fois traction et compression : le béton armé est un bon choix

La solution choisie par l'architecte est la réalisation de l'élément en **béton armé**.



Autre solution : la poutre treillis : Solution ingénieuse permettant de **décomposer la flexion globale en compressions et en tractions locales** dans chaque élément, une poutre treillis en acier aurait été également une bonne solution.

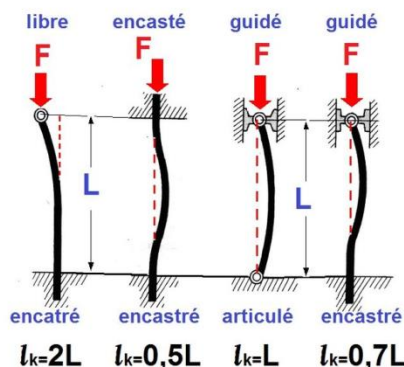
Question 5 : quelle instabilité est la plus susceptible de se produire sur les éléments porteurs ? Comment lutter contre ce risque ?

Réponse : le **flambement**. Il s'agit d'une instabilité liée à l'élanement du poteau. Pour réduire le risque d'apparition de l'instabilité, il faut donc **réduire l'élanement** (cf. SI-C7 à venir).

Pour cela deux solutions :

- soit augmenter la section du poteau, ou mieux faire un tube pour augmenter l'inertie de la section sans en augmenter la masse.

- soit réduire sa hauteur en ajoutant, par exemple, une liaison intermédiaire ou en changeant les conditions d'appuis aux extrémités. Ces conditions d'appuis ont en effet une incidence sur le flambage, au travers d'une longueur dite "de calcul".



2. Descente de charges

Afin d'effectuer une descente de charges, exercice de base d'une étude structurel, il est nécessaire de réaliser auparavant un schéma statique et d'évaluer les différents chargements. Enfin, nous déterminerons les réactions aux appuis grâce Principe Fondamental de la Statique.

2.1 Calcul des chargements

2.1.1 Les types de charges :

	CHARGES PONCTUELLES	CHARGES LINEIQUES	CHARGES SURFACIQUES
Fonction	La force se concentre en un point	L'action se répartit sur une ligne	L'action se répartit sur toute la surface .
Unité	N	N/m	N/m ²
Exemple	Poids d'un poteau	Poids d'un voile	Charge du vent
Illustration			

2.1.2 La classification des charges :

CHARGES PERMANENTES	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Structurelles (G)</u> si elles participent à la structure (murs porteurs, poteaux, poutres, dalles, etc.) • <u>Non structurelle (G')</u> si elle ne participe pas à la structure (revêtements, cloisons, etc.) 	
CHARGES VARIABLES	<u>Charges d'exploitation (Q)</u> : poids des usagers, des meubles, etc. <u>Charges climatiques</u> : vent (W), neige (S)	
AUTRES CHARGES	<u>Charges accidentelles</u> : séisme, choc de camion, etc.	

2.1.3 Les Etats Limites :

Deux critères, appelés Etat Limites, sont à vérifier indépendamment pour tous les bâtiments :

- **L'Etat Limite de Service (ELS)**

C'est une **condition d'usage** qui doit être maintenue pour une **utilisation normale** (le bâtiment ne doit avoir une **déformation** de nature à gêner les gens qui l'utilisent) = doit être respectée pour des **charges normales, habituelles**.

- **L'Etat Limite Ultime (ELU)**

C'est une condition de **non-effondrement** relative à la **sécurité des personnes** qui doit être maintenue même sous des **conditions extrêmes**.

A chaque état limite correspondent des coefficients de pondération des charges, appelés coefficients de sécurité. Ils permettent de combiner les charges.

ELS :

$$1*(G+G') + 1*Q$$

ELU :

$$1,35*(G+G') + 1,5*Q$$

2.2 Principe fondamental de la statique

2.2.1 Enoncé du P.F.S.

LE PRINCIPE FONDAMENTAL DE LA STATIQUE – A SAVOIR PAR CŒUR

Conditions nécessaires et suffisantes à l'équilibre des structures :

1. La structure ne subit pas de glissement : théorème de la résultante statique.

Le glissement est le déplacement en translation d'une structure. Il est dû à l'action des forces. Pour qu'une structure ne glisse pas, il faut donc que la somme des vecteurs forces qui s'exercent sur la structure soit nulle.

$$\sum \vec{F} = \vec{0} \quad \text{soit en projection} \quad \begin{cases} \sum F_X = 0 \\ \sum F_Y = 0 \end{cases}$$

2. La structure ne subit pas de basculement : théorème du moment statique.

Le basculement est dû à une rotation. Il est dû aux Les moments qui agissent sur la structure. Pour éviter le basculement, il faut donc que la somme des moments qui s'exercent sur la structure, calculés en un même point quelconque de la structure, soit nulle.

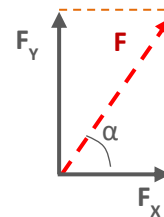
$$\sum M_A(\vec{F}) = 0$$

2.2.1 Descente de charges

Application du Principe Fondamental de la Statique (PFS) en 6 étapes :

1. La définition d'un repère orthonormé et d'un sens de rotation conventionnellement positif
2. La liste des forces verticales et des forces horizontales
3. La décomposition des forces obliques en composantes horizontales et verticales

(s'il n'y a pas de forces obliques, étape à sauter)



$$\begin{cases} F_X = F * \cos(\alpha) \\ F_Y = F * \sin(\alpha) \end{cases}$$

4. On applique le PFS sur les forces dans le sens gravitaire (en Y)

$$\sum F_Y = 0$$

5. On applique le PFS sur les forces horizontales (en X)

$$\sum F_X = 0$$

(s'il n'y a pas de forces horizontales, étape à sauter)

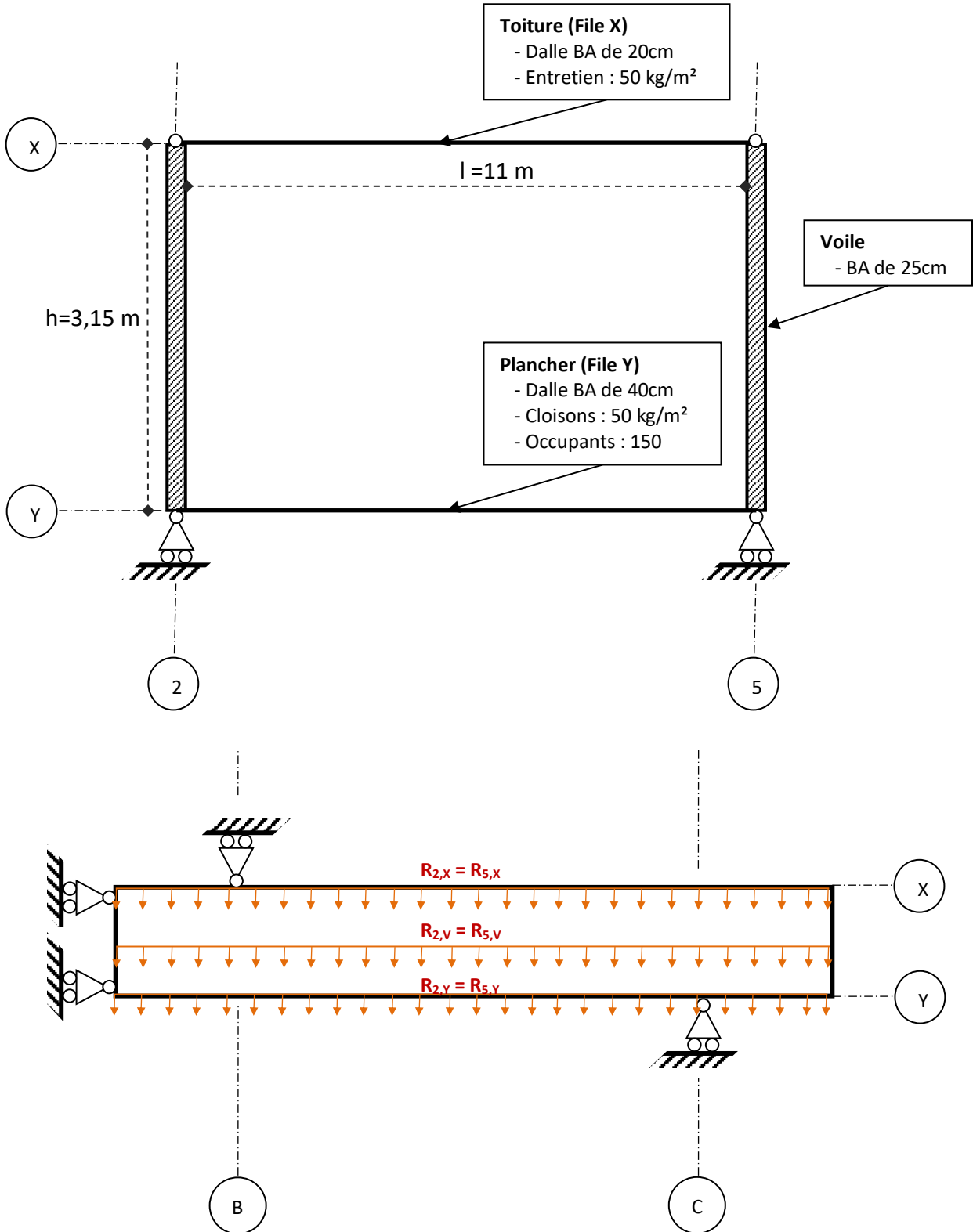
6. S'il reste une inconnue à calculer, on applique le PFS sur les moments en un point choisi judicieusement (ex. un appui) pour éliminer une ou plusieurs inconnues

$$\sum M_A(\vec{F}) = 0$$

TD 1 : ANALYSE D'UNE STRUCTURE : VILLA LEMOINE

Question 6 : Déterminer le chargement (à l'ELS) des poutres-voiles.

COUPE TYPE



Solution :

Toiture (File X) :

$$G_X = e_X \cdot \rho \cdot g = 0,2 \cdot (2500 \cdot 10) = 5000 \text{ N/m}^2$$

$$G'_X = 0 \text{ N/m}^2$$

$$Q_X = 50 \cdot 10 = 500 \text{ N/m}^2$$

Chargement ELS total sur toit : $T_X = G_X + G'_X + Q_X = 5500 \text{ N/m}^2$

Résultante du chargement du toit sur chacun des bords de la poutre-voile

(chaque poutre-voile porte la moitié du poids de la toiture):

$$R_{2,X} = R_{5,X} = \frac{l}{2} \cdot T_X = \frac{11}{2} * 5500 \text{ N/m}^2 = 30,25 \text{ kN/ml}$$

Plancher (File Y) :

$$G_Y = e_Y \cdot \rho \cdot g = 0,4 \cdot (2500 \cdot 10) = 10000 \text{ N/m}^2$$

$$G'_Y = 50 \cdot 10 = 500 \text{ N/m}^2$$

$$Q_Y = 150 \cdot 10 = 1500 \text{ N/m}^2$$

Chargement ELS total sur plancher : $T_Y = G_Y + G'_Y + Q_Y = 12000 \text{ N/m}^2$

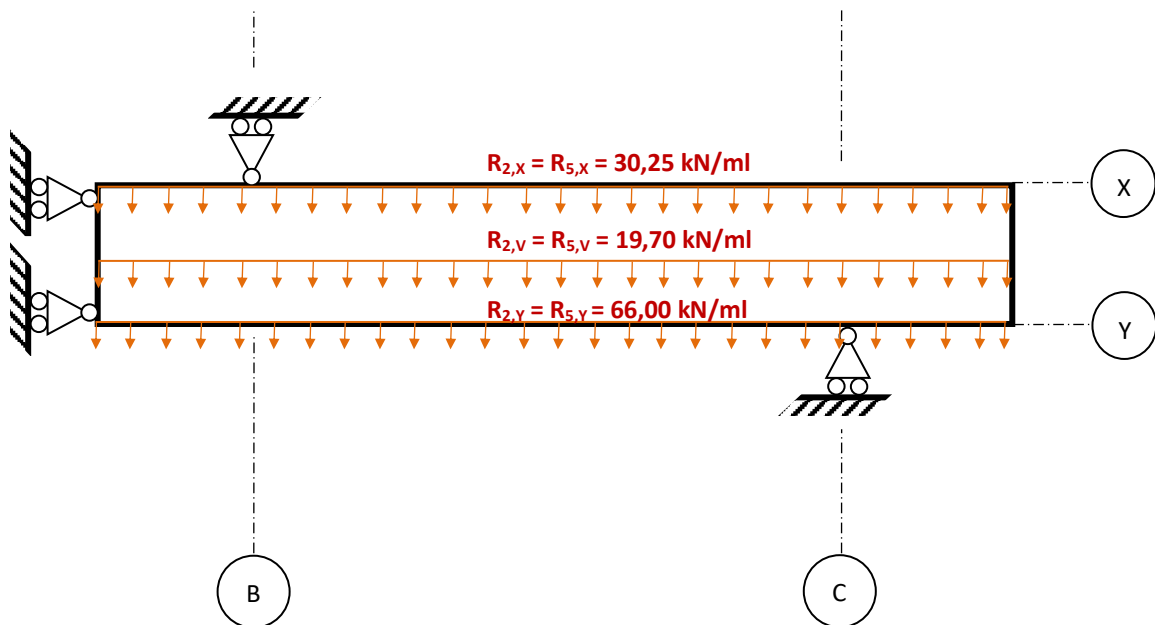
Résultante du chargement du toit sur chacun des bords de la poutre-voile

(chaque poutre-voile porte la moitié du poids du plancher):

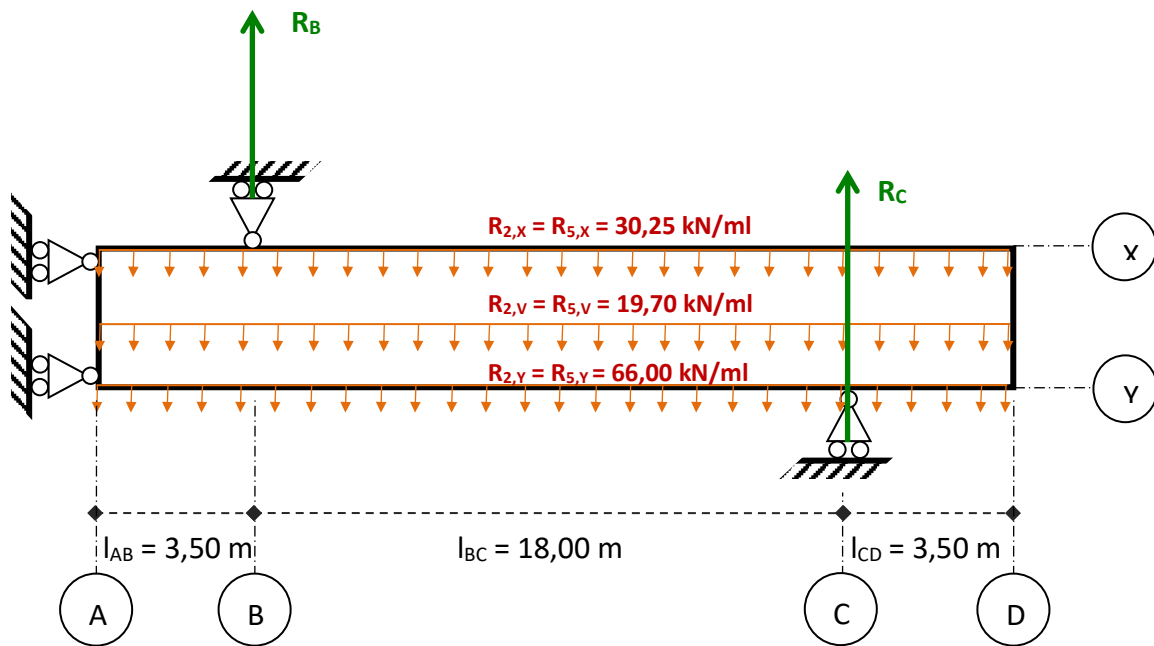
$$R_{2,Y} = R_{5,Y} = \frac{l}{2} \cdot T_Y = \frac{11}{2} * 12000 \text{ N/m}^2 = 66,00 \text{ kN/ml}$$

Poids propre d'un voile:

$$R_{2,V} = R_{5,V} = G_V = e_V \cdot h \cdot \rho \cdot g = 0,25 \cdot 3,15 \cdot (2500 \cdot 10) = 19,70 \text{ kN/ml}$$



Question 7 : Déterminer les réactions R_B et R_C aux appuis.

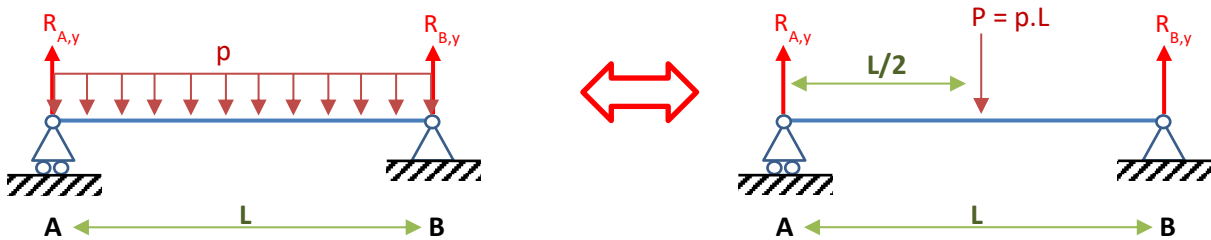


Solution :

Résultante totale des efforts sur le voile :

$$R_{TOT} = R_{2,x} + R_{2,y} + R_{2,v} \approx 116 \text{ kN/ml}$$

Rappel : on admet que le moment d'une force uniformément répartie est égal à celui de sa résultante.



Moment en B :

$$M_B = R_C \cdot l_{BC} - R_{TOT} * (l_{AB} + l_{BC} + l_{CD}) * \frac{l_{BC}}{2}$$

Equation de la statique du moment en B :

En B, nous avons une rotule, donc :

$$M_B = 0$$

$$R_C \cdot l_{BC} = R_{TOT} * (l_{AB} + l_{BC} + l_{CD}) * \frac{l_{BC}}{2} \quad \text{soit} \quad R_C = \frac{R_{TOT}}{2} * (l_{AB} + l_{BC} + l_{CD})$$

Moment en C :

$$M_C = -R_B \cdot l_{BC} + R_{TOT} * (l_{AB} + l_{BC} + l_{CD}) * \frac{l_{BC}}{2}$$

Equation de la statique du moment en C :

En C, nous avons une rotule, donc : $M_C = 0$

$$R_B \cdot l_{BC} = R_{TOT} * (l_{AB} + l_{BC} + l_{CD}) * \frac{l_{BC}}{2} \quad \text{soit} \quad R_B = \frac{R_{TOT}}{2} * (l_{AB} + l_{BC} + l_{CD})$$

On a donc :

$$R_B = R_C$$

On aurait pu admettre ce résultat dès le début en remarquant la symétrie du problème. Le voici démontré.

Equation de la statique des forces :

$$R_B + R_C = R_{TOT} \cdot (l_{AB} + l_{BC} + l_{CD})$$

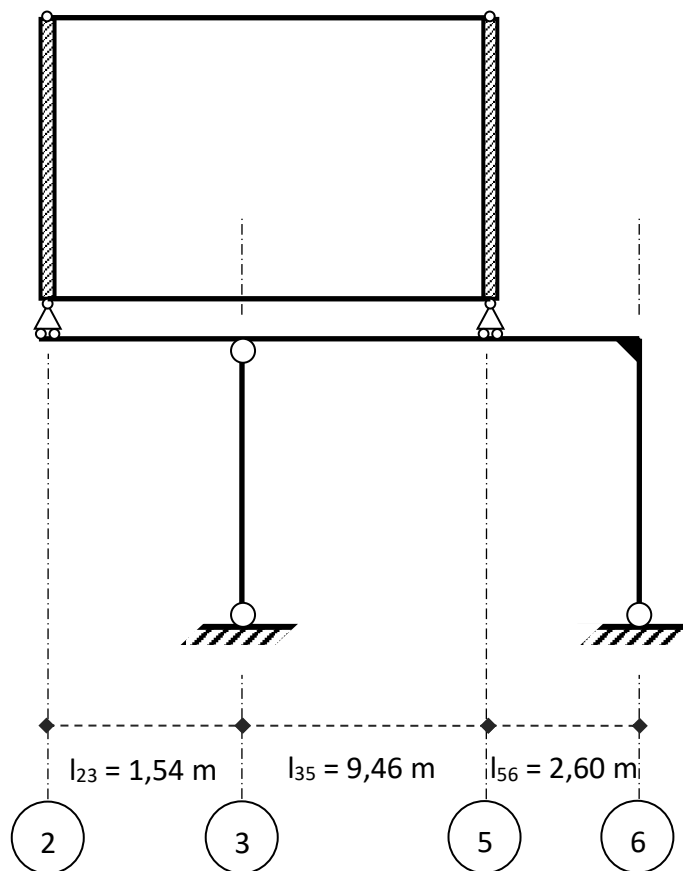
Or :

$$R_B = R_C$$

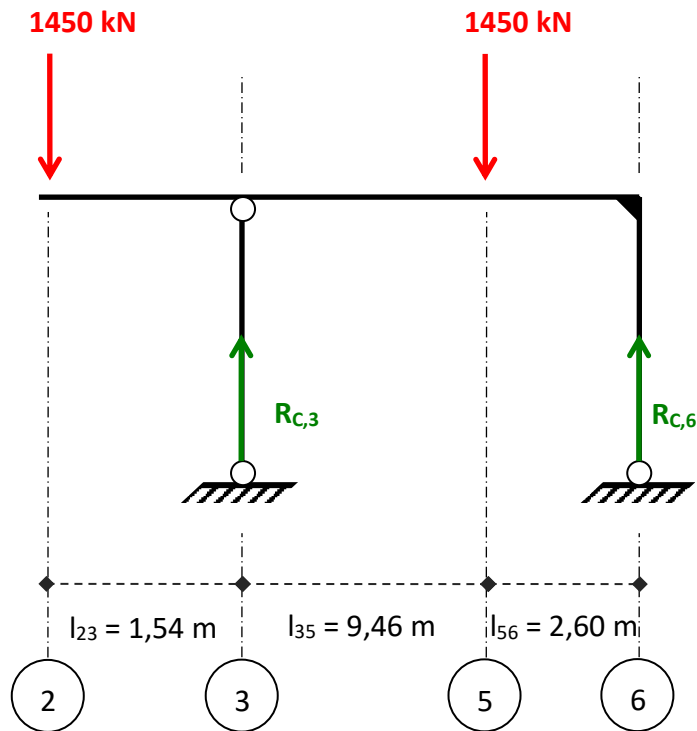
Donc :

$$R_B = R_C = \frac{R_{TOT} \cdot (l_{AB} + l_{BC} + l_{CD})}{2} = 1450 \text{ kN}$$

Question 8 : Déterminer la descente de charges en file C.



Solution :



Equation du moment en O3 (rotule):

$$M_{O_3} = R_{C,6} \cdot l_{36} + 1450 \text{ kN} \cdot l_{23} - 1450 \text{ kN} \cdot l_{35} = 0$$

$$R_{C,6} \cdot l_{36} = 11484 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$R_{C,6} = \frac{11484 \text{ kN} \cdot \text{m}}{l_{36}} = \mathbf{952 \text{ kN}}$$

Equation du moment en O6 (rotule):

$$M_{O_6} = 1450 \text{ kN} \cdot l_{26} + 1450 \text{ kN} \cdot l_{56} - R_{C,3} \cdot l_{36} = 0$$

$$R_{C,3} \cdot l_{36} = 23490 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$R_{C,3} = \frac{23490 \text{ kN} \cdot \text{m}}{l_{36}} = \mathbf{1948 \text{ kN}}$$

Vérification avec équation de la statique des forces :

$$R_{C,3} + R_{C,6} = 952 + 1948 = 2900 \text{ kN} = 2 \cdot 1450 \text{ kN}$$

Les réactions aux appuis équilibrent bien les forces verticales agissant sur la file étudiée.

Question 9 : Déterminer la descente de charges en file B.

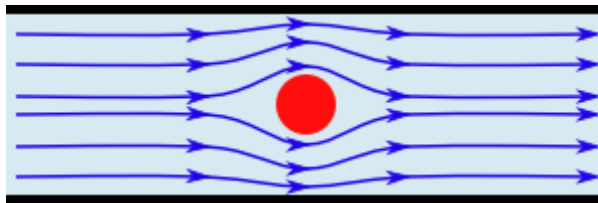
Solution : La méthode à suivre est identique à celle de la question 8.

3. Le vent et le contreventement

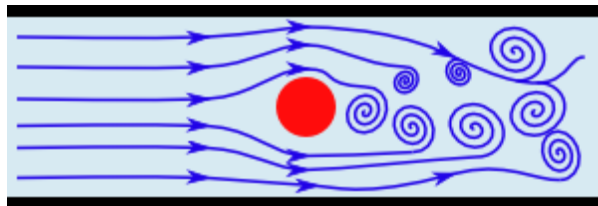
3.1 Principes théoriques des écoulements d'air

L'air est un fluide visqueux. Un filet d'air, imaginaire et extrêmement fin, en mouvement entraînera en partie les filets d'air qui lui sont voisins.

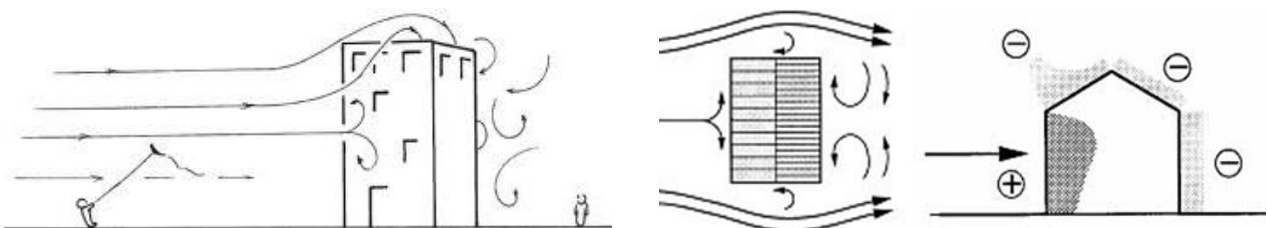
A l'approche d'un obstacle, les particules d'airs dévient pour le contourner mais toutes les particules le font pendant un temps égal (car l'air est considéré comme incompressible) : elles accélèrent donc autour de l'obstacle.



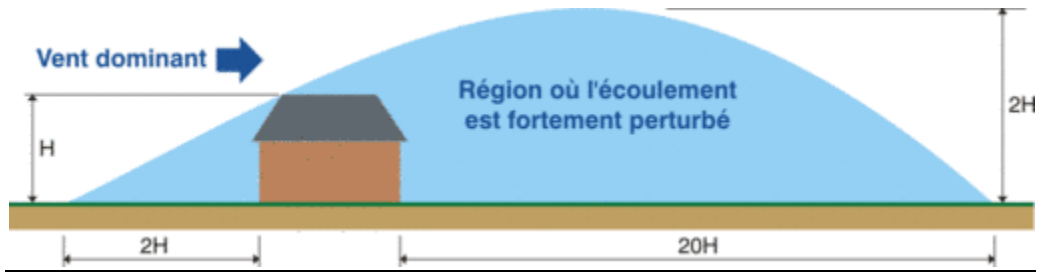
Lorsque la vitesse du fluide atteint une certaine valeur autour du même obstacle, le flux perd de sa cohérence et apparaissent des turbulences derrière l'obstacle. Un obstacle plus grand ou une forme plus angulaire peuvent également faciliter l'apparition des turbulences.



Autour d'un bâtiment, les turbulences se forment sur la face derrière le vent et, souvent, au niveau de la toiture. Ces zones de turbulences sont soumises à des dépressions qui créent un effet de succion tandis que la face au vent subit une pression conséquente.



3.2 Principes de calculs du vent



La pression dynamique du vent est donnée par :

$$q_b = \rho \frac{V^2}{2} \left[\frac{daN}{m^2} \right]$$

avec $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ (masse volumique de l'air)

et V correspondant à une vitesse moyenne de référence qui est normative.

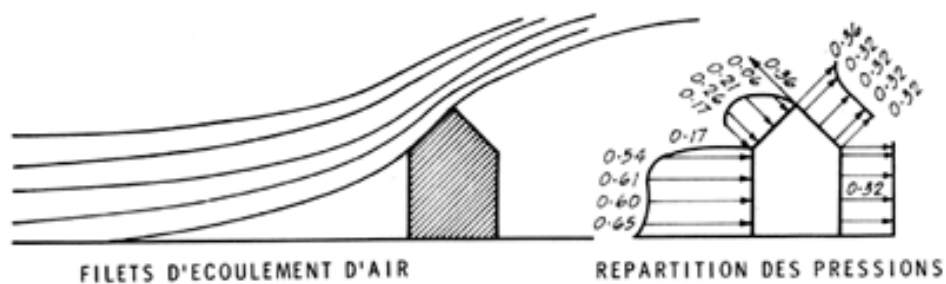
Elle dépend notamment du lieu, du terrain, de la rugosité et de la direction du vent.

La force résultante sur une face du bâtiment vaut :

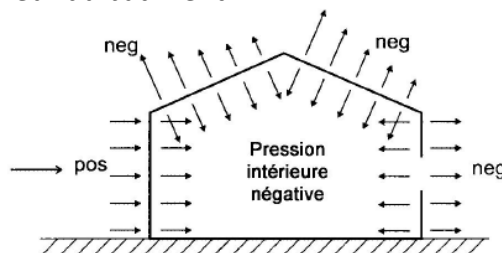
$$F = c \cdot q_p \cdot A$$

avec q_p est la pression de pointe dépendant de la zone géographique, de la hauteur du bâtiment, de son orientation, de son environnement immédiat, etc.

et c est un coefficient prenant en compte la pression ou la succion sur la face étudiée du bâtiment, de sa géométrie, son inclinaison et de sa position relative à l'écoulement, ainsi que la pression à l'intérieur de celui-ci :

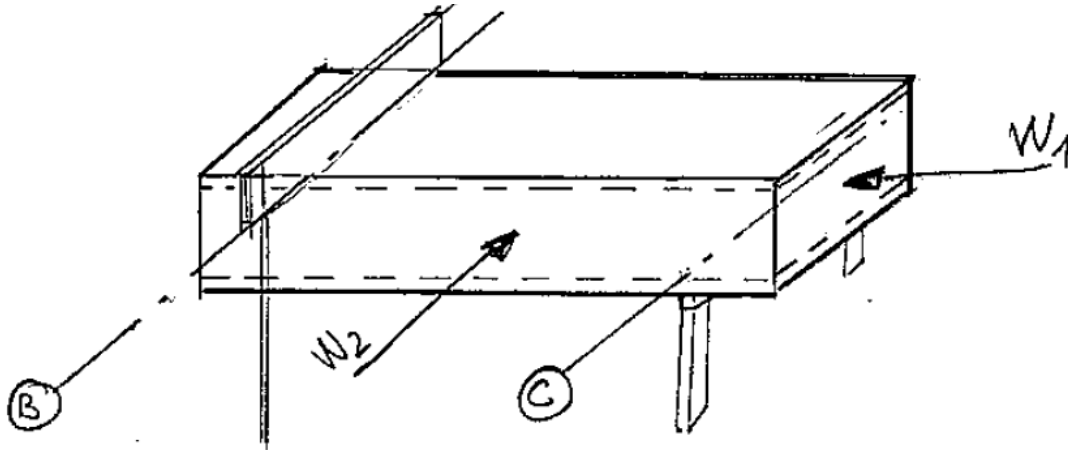


Au coefficient c s'additionne ou se soustrait, selon le cas, la pression (positive ou négative) à l'intérieur du bâtiment :



TD 1 : ANALYSE D'UNE STRUCTURE : VILLA LEMOINE

Question 10 : Déterminer le chargement horizontal du vent sur les faces exposées aux pressions et aux dépressions.

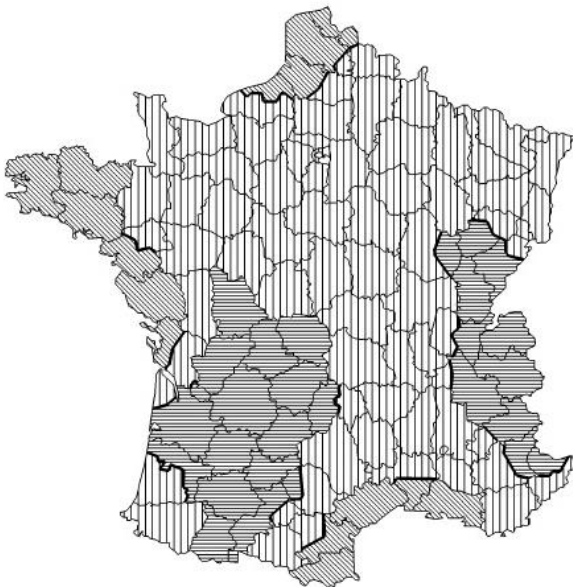


Hypothèses :

- on néglige la pression du vent sur la toiture
- les faces au vent subissent un coefficient de pression de $c_{e,1} = +0,8$
- les faces opposées au vent ont un coefficient de pression de $c_{e,2} = -0,5$
- tout l'intérieur du bâtiment subie une dépression avec un coefficient de $c_i = -0,3$

Solution :

La maison se situe à Bordeaux :



La vitesse de référence du vent est donc :

$$V_{b,0} = 22 \text{ m/s}$$

Dans la norme, des coefficients pondèrent cette vitesse.

Ils dépendent du terrain, de la direction du vent, et d'autres facteurs. Pédagogiquement, nous ne les considérons pas ici.

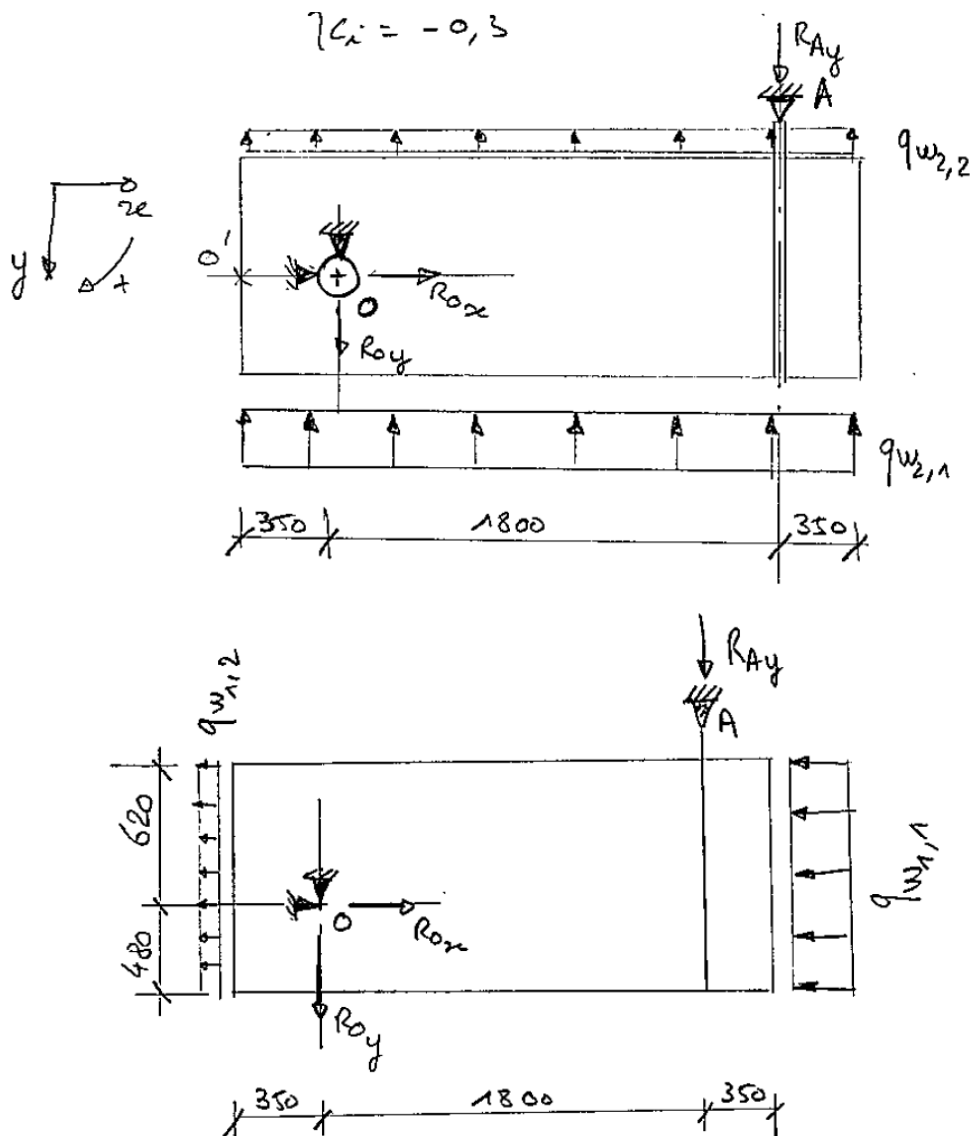
On admet donc pour simplifier ici que $q_p = q_b$

On obtient la valeur de la pression dynamique du vent :

$$q = \rho \frac{V^2}{2 \cdot g} = 1,25 * \frac{22^2}{2} = 30,25 \text{ daN/m}^2$$

Régions :	1	2	3	4
Valeur de base de la vitesse de référence du vent $v_{b,0}$ [m/s]	22	24	28	28

On obtient donc les forces suivantes :



$$q_{w1,1} = q_{w2,1} = (c_{e,1} - c_i) \cdot q \cdot h = (0,8 - (-0,3)) \cdot 30,25 \cdot 3,15 \approx 105 \text{ daN/ml}$$

$$q_{w1,2} = q_{w2,2} = (c_{e,2} + c_i) \cdot q \cdot h = (-0,5 - (-0,3)) \cdot 30,25 \cdot 3,15 \approx -19 \text{ daN/ml}$$

Question 11 : Déterminer les réactions aux appuis. Justifier l'utilisation d'un poteau cylindrique.

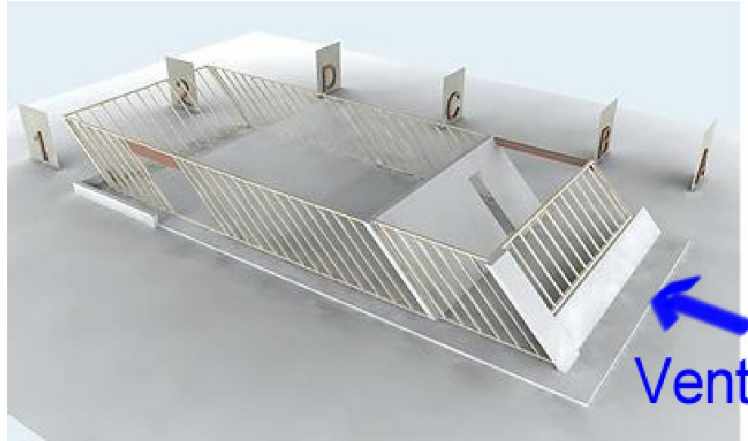
Solution : Appliquer la méthodologie de la partie II à chacun des cas (vent venant du sud puis vent venant de l'est. On obtient :

$$\begin{array}{lll}
 R_{Ox,sud} = 0 \text{ daN} & + & R_{Ox,est} = 1364 \text{ daN} & = & R_{Ox,est} = 1364 \text{ daN} \\
 R_{Oy,sud} = 1550 \text{ daN} & + & R_{Oy,est} = -53 \text{ daN} & = & R_{Oy,est} = 1497 \text{ daN} \\
 R_{Ay,sud} = 1550 \text{ daN} & + & R_{Ay,est} = 53 \text{ daN} & = & R_{Ay,est} = 1603 \text{ daN}
 \end{array}$$

Le poteau est à peu près centré car l'excentricité augmenterait le bras de levier et donc la torsion. Une forme circulaire est très efficace pour lutter contre la torsion.

3.3 Principes de contreventement

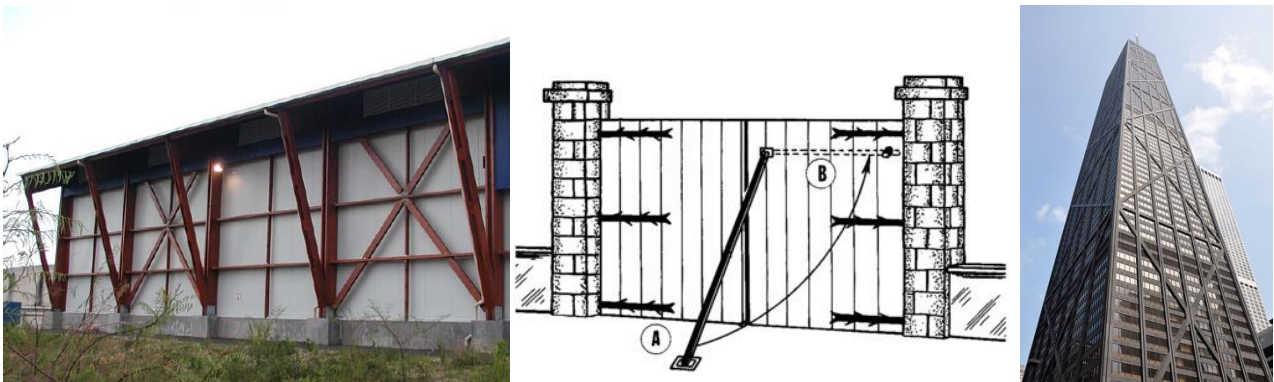
Nous avons déjà vu qu'une structure réticulée non contreventée subirait de grandes déformations. Si la structure n'est contreventée que par des appuis encastrés, ceux-ci risquent de subir des efforts particulièrement importants. Des rotules plastiques seraient alors susceptibles de se former.



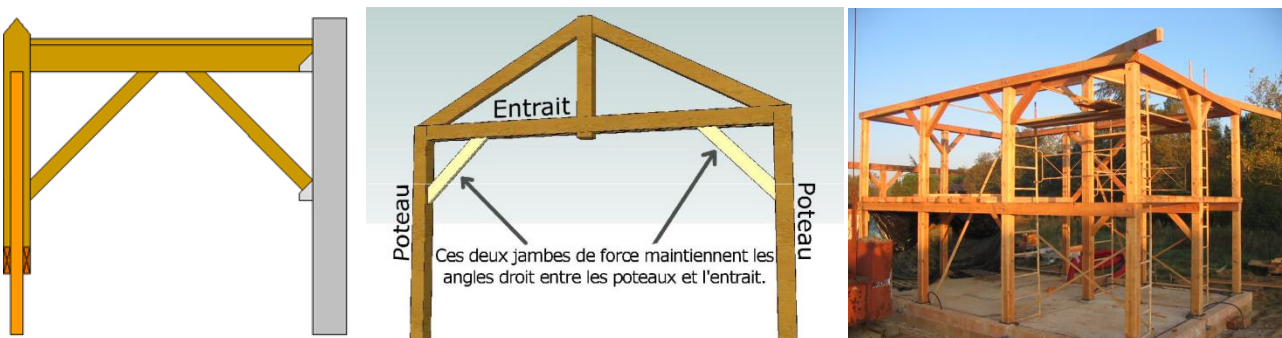
L'idée du contreventement est de transmettre l'effort horizontal du vent aux poteaux : il faut donc le "transformer" en effort vertical. C'est pour cette raison que des éléments obliques à 45° sont généralement utilisés.

Ci-dessous, quelques illustrations de différentes solutions de contreventement.

Croix de Saint-André et autres types de contreventement par barres obliques.



En réduisant la taille des barres, on passe progressivement dans le domaine du contreventement par encastrement des coins.



En utilisant des croix, le contreventement peut se faire par câbles. Quelque soit la direction de la déformation, un des câbles sera tendu et l'autre sera lâche.



Le contreventement peut passer par le plancher. On parle de planchers diaphragmes, c'est une méthode notamment utilisée dans la Maison à Bordeaux.

