

## **AVANT PROPOS**

Nous présentons dans ce qui suit quelques rappels utiles. Bien sûr, même si nous ne le rappelons pas dans ce chapitre, les connaissances de base de la RDM sont plus que nécessaires pour la compréhension des cours de béton armé.

### **FOREWORD**

In the following, we present a few useful reminders. Of course, even if we do not emphasize it in this chapter, basic knowledge of Structural Mechanics (RDM) is more than necessary for understanding reinforced concrete courses.

### **BASES DU BÉTON ARMÉ**

Le béton est un mélange dans des proportions préétablies de liant (ciment), avec des granulats (sable, gravier, pierailles) et de l'eau.

Le béton armé peut être défini comme l'enrobage par du béton, d'aciers disposés judicieusement. Ces aciers sont appelés armatures. On distingue les armatures longitudinales disposées suivant l'axe longitudinal de la pièce, des armatures transversales disposées dans des plans perpendiculaires à l'axe de la pièce.

Le béton armé ne repose pas toujours sur des théories scientifiques. Les formules de calcul et les nombreux coefficients utilisés ont souvent un caractère empirique, mais il est essentiel qu'ils aient été fixés à la suite de nombreux essais et que les résultats de calcul soient conformes à l'expérience.

### **FUNDAMENTALS OF REINFORCED CONCRETE**

Concrete is a mixture of cement (binder), aggregates (sand, gravel, stones), and water in predetermined proportions.

Reinforced concrete can be defined as concrete that encases steel bars judiciously placed. These steel bars are called reinforcements. We distinguish between longitudinal reinforcements, which are arranged along the longitudinal axis of the element, and transverse reinforcements, which are placed in planes perpendicular to the axis of the element.

Reinforced concrete does not always based on scientific theories. The calculation formulas and the numerous coefficients used often have an empirical nature, but it is essential that they have been determined after following numerous tests and that the calculation results align with practical experience.

Jusqu'en 1980, le béton armé a été calculé par la méthode dite aux contraintes admissibles. Ces contraintes admissibles étaient définies sur la base des contraintes de rupture ou de limite élastique des matériaux et ensuite on les multipliait par un coefficient de sécurité. Le coefficient de sécurité pris sur le béton est longtemps resté égal à 28% de la limite de rupture à 90 jours, le coefficient de sécurité de l'acier à 60% de sa limite élastique.

Il suffisait ensuite de calculer les contraintes dans l'acier et le béton sous l'effet le plus défavorable des charges et de vérifier que l'on ne dépassait pas ces contraintes admissibles.

Until 1980, reinforced concrete was calculated using the so-called allowable stress method. These allowable stresses were defined based of the breaking stresses or elastic (yield) limit of the materials and then multiplied by a safety factor. For a long time, the safety factor for concrete was equal to 28% of the breaking limit at 90 days, while the safety factor for steel was equal to 60% of its elastic limit.

All that was then needed was to calculate the stresses in the steel and concrete under the most unfavourable loading conditions and check that these allowable stresses were not exceeded.

Cette notion de la sécurité a évolué et l'on cherche à prendre en compte tous les facteurs d'insécurité séparément, comme par exemple : This concept of safety has evolved, and we are now trying to take into account all the factors that contribute to insecurity factors separately, such as :

- La résistance intrinsèque des matériaux, [The intrinsic strength of materials](#)
- La valeur la plus probable des charges permanentes et des charges variables, [The most probable value of permanent and variable loads](#)
- L'aspect favorable ou défavorable de ces actions, [The favourable or unfavourable aspect of these actions](#)
- Les approximations de calcul des sollicitations (efforts tranchants, moments fléchissant...), [Approximations for calculating forces \(shear forces, bending moments, etc.\)](#)
- Les défauts géométriques des matériaux et de leur position, [Geometric defects in materials and their positioning](#)
- La fissuration. [The Cracking](#)

Le calcul des structures en béton armé est de nos jours, effectué à l'aide des règlements aux états limites (BAEL).

Nowadays, reinforced concrete structures are calculated using ultimate limits states concepts.

### PRINCIPE DU BÉTON ARMÉ

Dans la plupart des structures, certaines parties sont soumises à des contraintes de compression et d'autres à des contraintes de traction. Or le béton est un matériau qui résiste fort bien en compression mais très mal en traction, alors que l'acier y résiste très bien. D'où l'idée de placer des barres d'acier dans les zones où se produisent des efforts de traction dirigées dans le sens de ces efforts ; on pourra donc voir apparaître dans ces zones des microfissures du béton sous l'effet des contraintes de traction mais les aciers empêcheront les fissures de s'ouvrir et prendront seuls à leur compte les efforts de traction. ***Le béton armé travaille en étant fissuré !***

### PRINCIPLE OF REINFORCED CONCRETE

In most structures, certain parts are subjected to compressive stresses, while others experience tensile stresses. Concrete is a material that resists well under compression but poorly under tension, whereas steel has excellent tensile strength. Hence, the concept of placing steel bars in areas where tensile forces occur, aligned with these forces. In these areas, micro-cracks may appear in the concrete due to tensile stresses, but the steel bars prevent these cracks from opening and bear the tensile forces on their own. Reinforced concrete works even when it is cracked!

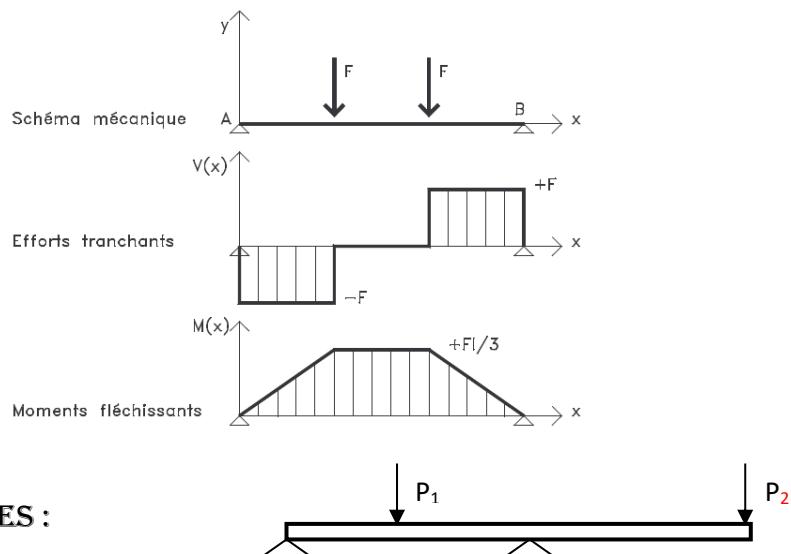
### **PRINCIPE DE LA CONSTRUCTION EN BÉTON ARMÉ :**

#### **FONCTIONNEMENT EN FLEXION**

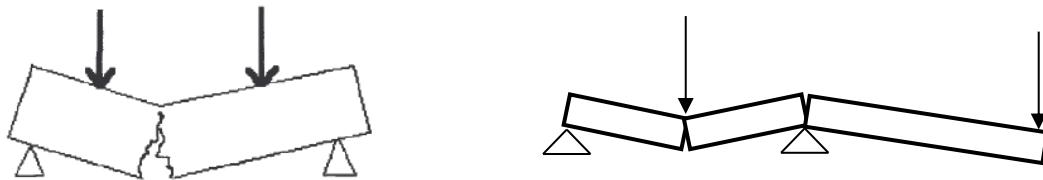
Considérons les deux poutres suivantes :

#### **PRINCIPLE OF REINFORCED CONCRETE CONSTRUCTION: BENDING BEHAVIOUR**

Let's consider the following two beams:



### POUTRES NON ARMÉES : Unreinforced Beams

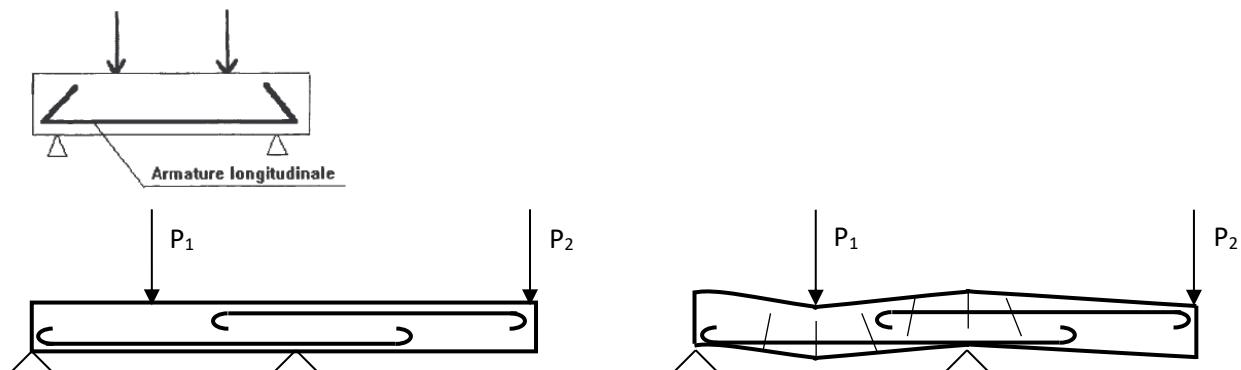


La rupture intervient brutalement sous une charge faible suite à une insuffisance en traction.  
 The rupture occurs Suddenly under a low load due to a lack of tensile strength.

### POUTRES ARMÉES LONGITUDINALEMENT :

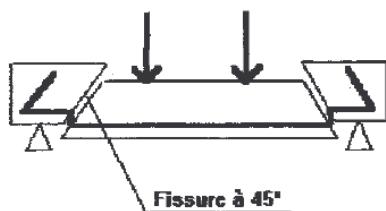
Là où le béton montre des insuffisances (contraintes de traction), nous disposons des armatures.

**LONGITUDINALLY REINFORCED BEAMS:** Where concrete exhibits weaknesses (tensile stresses), we have reinforcements in place."



Au moment de l'apparition des fissures, le béton a cessé de résister en traction et c'est l'acier qui a pris le relais. Les armatures empêcheront ces microfissures de s'ouvrir davantage et prendront seuls en compte les efforts de traction. Il en résulte que pour reprendre la flexion, il suffit de disposer des armatures longitudinales.

At the moment the cracks appear, the concrete has ceased to resist tensile stress and the steel takes over. The reinforcement will prevent these micro-cracks from opening any further and will only bear the tensile forces. As a result, longitudinal reinforcement is all that is needed to resist flexion.

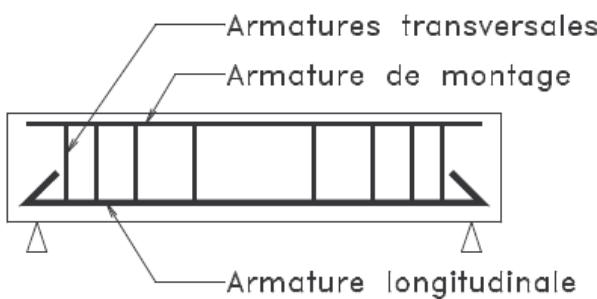


By increasing the loads, cracks at 45 degrees appear at the two support zones the deficiencies (insufficient concrete shear strength). The rupture of the Beam occurs along these cracks.

Lorsque aucune armature n'est prévue pour reprendre **la traction** due à l'effort tranchant, il y a rupture à cause des fissures qui se développent selon des directions orthogonales à la contrainte principale de traction. Une façon pour reprendre cette traction consiste à disposer des armatures transversales ; on dit que l'on réalise la **couture** de la section.

When no reinforcement is provided to resist the tensile forces caused by shear forces, failure occurs due to cracks that develop in directions orthogonal to the principal tensile stress. One way to counteract this tensile force is by using transverse reinforcements; this is referred to as section "**stitching**."

### POUTRE ARMÉE LONGITUDINALEMENT ET TRANSVERSALEMENT :



En ajoutant des armatures transversales, la rupture intervient beaucoup plus tard que dans les deux cas précédents. Les armatures longitudinales et transversales limiteront l'ouverture des fissures.

By adding transverse reinforcement, failure occurs much later than in the two previous cases. Longitudinal and transverse reinforcement will limit crack opening.

L'exemple permet de voir que les armatures ne sont pas choisies au hasard. Leur disposition n'est pas quelconque. Les techniques de ferraillage ont atteint actuellement l'état de l'art. Elles répondent de manière satisfaisante au problème fondamental de calcul des structures en béton armé.

The example shows that the reinforcements are not chosen randomly. Their arrangement is not arbitrary. Reinforcement techniques have now reached the state of the art. They provide a satisfactory response to the fundamental problem of calculating reinforced concrete structures.

#### REMARQUE :

Si, par exemple les armatures sont induites de graisse, elles glisseront dans le béton et ne s'opposeront plus à l'ouverture des fissures. Le fonctionnement d'une telle association sera conditionné par une parfaite adhérence entre l'acier et le béton.

#### NOTE:

If, for example, the reinforcements are covered in grease, they will slip in the concrete and will no longer prevent the opening of cracks. The effectiveness of such an association depends on a perfect adhesion between steel and concrete.

### L'ADHÉRENCE ACIER-BÉTON

Le béton armé étant une structure composite (béton et acier), la compréhension du comportement de l'interface entre les deux matériaux est nécessaire.

Donc, il est primordial de bien connaître les différents paramètres ( $f_{c28}$ , HA, rond lisse) qui influencent le comportement de l'interface, et de justifier une des hypothèses importantes des calculs en béton armé, à savoir qu'il n'y a pas de glissement des barres d'acier (donc  $\epsilon_b = \epsilon_s$ ).

L'adhérence de l'acier et du béton peut être mesurée sur un essai d'arrachement, dont le principe est présenté sur la Figure 1. À partir de ces essais, on obtient des courbes reliant le déplacement du bout de l'acier à l'effort de traction appliqué  $F$ . La Figure 2 donne un exemple de courbes obtenues, pour un HA et un rond lisse de même diamètre ( $\varnothing=14\text{mm}$ ).

#### "STEEL-CONCRETE ADHESION"

As reinforced concrete is a composite structure (concrete and steel), it is necessary to understand the behaviour of the interface between the two materials.

It is therefore essential to be familiar with the various parameters ( $f_{c28}$ , type of reinforcement) that influence the behaviour of the interface, and to justify one of the important assumptions of reinforced concrete calculations, namely that there is no sliding of the steel bars (therefore  $\varepsilon_b = \varepsilon_s$ ).

The adhesion of steel and concrete can be measured in a pull-out test, the principle of which is shown in Figure 1. From these tests, curves can be obtained relating the displacement of the end of the steel to the applied tensile stress  $F$ . Figure 2 gives an example of the curves obtained, for an HA and a smooth round bar of the same diameter ( $\varnothing=14\text{mm}$ ).

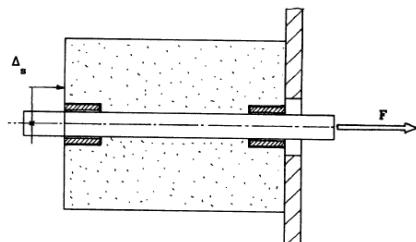


Fig. 1 Principe du dispositif expérimental pour réaliser un essai d'arrachement.

Fig. 1 Principle of the experimental setup for conducting a pull-out test."

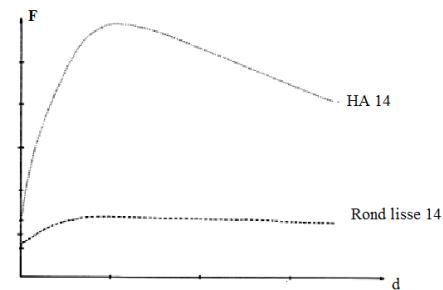


Fig. 2 Courbes obtenues pour des essais d'arrachement sur un acier HA et un rond lisse.

Fig. 2 Curves obtained from pull-out tests on high-strength steel (HA) and a smooth round bar.

On a mis en évidence l'influence :

- La longueur de l'armature ancrée,
- Le type d'acier (HA et rond lisse),
- La qualité du béton.

Et ainsi on détermine la valeur de la contrainte d'adhérence en fonction des conditions de l'essai.

We have highlighted the influence of:

- Anchorage length,
- Steel type (high-strength steel and smooth round bars),
- Concrete quality,

And thus we determine the value of the adhesion stress depending on the test conditions.

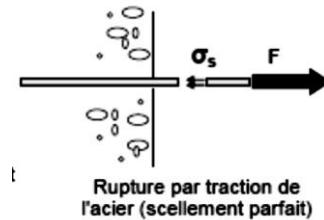
L'adhérence est un phénomène de liaison tangentielle à l'interface acier béton due au frottement et à l'arc-boutement des bielles de béton.

Supposons une barre scellée dans un massif en béton. Si on exerce un effort d'arrachement suivant l'axe de la barre, on peut avoir trois modes de rupture :

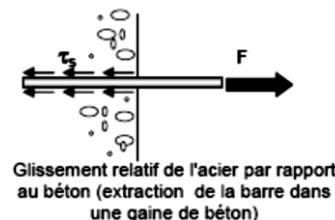
Adhesion is a tangential connection phenomenon at the steel/concrete interface due to friction and arcing of the concrete rods.

Let's consider a bar is embedded in a concrete block. If a pull-out force is applied along the axis of the bar, there are three possible modes of failure:

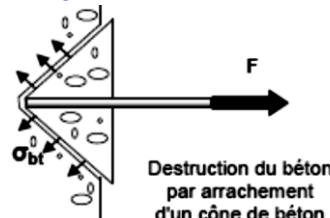
- Rupture par traction de l'acier (ancrage parfait),  
Failure due to steel tensile (perfect anchorage),



- Glissement de la barre dans le béton,  
Slippage of the bar within the concrete,



- Destruction du béton par arrachement d'un cône de béton.  
Destruction of the concrete by pulling out a cone of concrete.



On définit un **bon ancrage** comme un ancrage où lorsque la barre commence à glisser celle-ci vient d'atteindre la limite d'élasticité ( $F=As \cdot f_e$ )

Si on suppose que la contrainte d'adhérence est constante le long de la barre et s'il n'y a pas de glissement, on obtient en considérant l'équilibre selon x :

We define a good anchorage as one where, when the bar begins to slide, it has just reached the yield limit. If we assume that the anchorage stress is constant along the bar and there is no slippage, we obtain, by considering equilibrium along the x-axis:

$$F_{ext} = \int_{x_B}^{x_B} \tau_s u dx = \tau_s u l_{AB}$$

Où  $u$  est le périmètre utile de la barre et  $l_{AB}$  la longueur de l'ancrage.

Where  $u$  is the effective perimeter of the bar, and  $l_{AB}$  is the length of the anchorage.

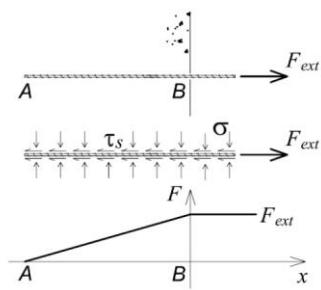


Fig. 3 Modélisation d'un essai d'arrachement

Fig. 3 Modeling of a pull-out test.

Ancrage rectiligne Straight Anchorage:

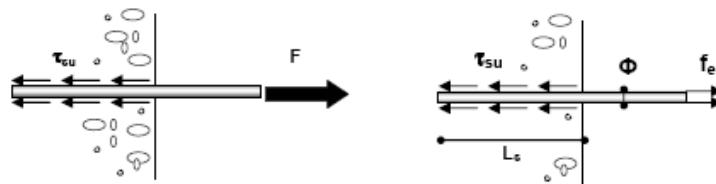
On définit la longueur de scellement droit  $l_s$  comme la longueur à mettre en œuvre pour avoir un **bon ancrage droit**.

We define the straight anchorage length  $l_s$  as the length to be used to achieve a good straight anchorage.

En sachant que :

Given that:

$$l_{AB} = l_s, u = \pi \cdot \emptyset \text{ et } A_S = \pi \cdot \emptyset^2 / 4 \text{ on a : } l_s = \frac{\emptyset f_e}{4\tau_s}$$



Dans la pratique les calculs d'ancrage sont réalisés à l'ELU et la valeur de la contrainte d'adhérence est donnée de façon forfaitaire par :

In practice, anchorage calculations are carried out at the ULS (Ultimate Limit State), and the adherence stress value is provided as follows:

$$\tau_{su} = 0,6\psi_s^2 f_{tj}$$

Où le coefficient de scellement  $\psi_s$  vaut 1 pour des ronds lisses et 1,5 pour des aciers HA. On retiendra que la longueur de scellement droit  $l_s$  dépend du type d'acier et de la qualité du béton.

On se propose d'adopter les valeurs forfaitaires suivantes :

Where the anchorage coefficient is 1 for smooth round bars and 1.5 for high-strength steel (HA). It is important to note that the straight anchorage length  $l_s$  depends on the type of steel and the quality of concrete.

We propose to adopt the following standard values:

$$l_s = 40\emptyset \text{ pour un HA, } f_e E400 \text{ et } l_s = 50\emptyset \text{ pour HA, } f_e E500 \text{ ou un rond lisse}$$

Pour des aciers HA, on utilisera le tableau ci-dessous pour calculer la longueur de scellement droit  $l_s$ .

For high-strength steel (HA), we will use the following table to calculate the straight anchorage length  $l_s$ .

	$f_cj$ (MPa)	20	25	30	35	40	45	50	55	60
fe E400	$l_s/\emptyset_l$	41	35	31	27	25	22	21	19	18
fe E500	$l_s/\emptyset_l$	51	44	39	34	31	28	26	24	22

Chaque barre d'un paquet de barres sera ancrée individuellement. Pour ancrer les barres d'un paquet de deux barres il faudra prévoir  $2l_s$  et pour un paquet de trois barres  $(2 + 1.5) l_s$ , puisque la troisième barre a un périmètre utile de seulement  $2\pi\emptyset/3$ .

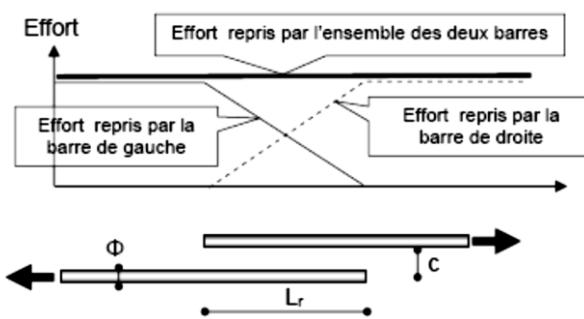
Each bar in a pack of bars will be individually anchored. To anchor the bars in a pack of two bars,  $2l_s$  will be required, and for a pack of three bars  $(2 + 1.5) l_s$ , as the third bar has an effective perimeter of only  $2\pi\emptyset/3$ .



### Longueur de recouvrement des armatures tendues

Dans certains cas, pour assurer la continuité de la transmission des efforts, il faut réaliser une jonction par recouvrement entre deux barres identiques sur une certaine longueur appelée "longueur de recouvrement" et notée " $L_r$ ".

In certain cases, length of Overlap for Tension Reinforcement to ensure the continuity of force transmission, it is necessary to create a splice by overlapping two identical bars over a certain length referred to as the 'overlap length' and denoted as ' $L_r$ '.



- Si  $c < 5\Ø$ ,  $L_r = l_s$
- Si  $c > 5\Ø$ ,  $L_r = l_s + c$

Dans ce cas, la transmission de l'effort d'une barre à l'autre se fait à travers des bielles de béton à  $45^\circ$  situées dans le plan des deux barres.

In this case, the transfer of force from one bar to another occurs through diagonal concrete rods at a  $45^\circ$  angle located in the plane of the two bars.

Ancrage courbe : Par manque de place, comme aux appuis de rives par exemple, on est obligé d'avoir recourt à des ancrages courbes afin de diminuer la longueur d'encombrement de l'ancrage. On pourrait aussi penser au gain d'acier, mais celui-ci est plus faible que le coût de la main d'œuvre nécessaire au façonnage de l'ancrage. Donc, quand il n'y a pas de problème pour placer un ancrage droit, c'est cette solution qu'il faut adopter.

Curved Anchorage : Due to space constraints, such as at the end supports, it is necessary to use curved anchorages to reduce the length of space occupied by the anchorage. You could also think of the saving in steel, but it is usually less significant than the workforce required for shaping the anchorage. Therefore, when there is no issue with placing a straight anchorage, that option should be chosen.

Un ancrage courbe est composé de deux parties droites  $AB$  et  $CD$  et d'une partie courbe  $BC$  de rayon de courbure  $R$  et d'angle  $\theta$  (voir Figure 5). Pour un crochet normal on peut adopter la longueur d'encombrement comme indiquée sur la figure 6.

A curved anchorage consists of two straight parts, AB and CD, and a curved part BC with a radius of curvature R and an angle  $\theta$  (see Figure 5). For a standard hook, the length of space occupied can be adopted as shown in Figure 6.

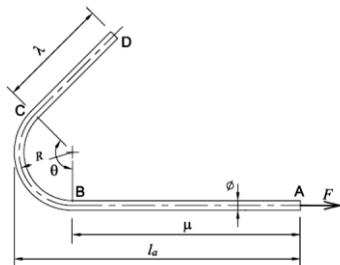


Fig. 5 Définition d'un ancrage courbe.

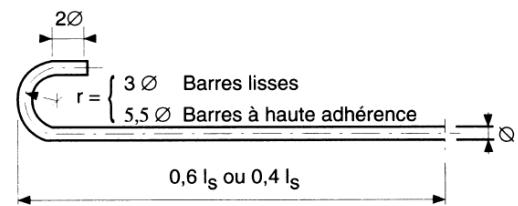


Fig. 6 Définition d'un crochet.

"Fig. 5 Definition of a curved anchorage."

"Fig. 6 Definition of a hook."

### LES ÉTATS LIMITES

Il est nécessaire de bien différencier les deux états limites qui sont à considérer dans tous les calculs de béton armé. Un état limite est un état pour lequel une condition requise d'une construction (ou d'un de ses éléments) est strictement satisfaite et cesserait de l'être en cas de variation défavorable d'une des actions appliquées. La théorie des états limites considère 2 états limites.

**It is essential to clearly distinguish between the two limit states that must be considered in all reinforced concrete calculations. A limit state is a state in which a required condition of a construction (or one of its components) is strictly satisfied and would cease to be so in the event of an unfavourable change in any of the applied actions. Limit state theory considers 2 limit states.**

- **État limite de service (ELS)** : L'état limite de service remet en cause l'aptitude au service de la structure (fissures, fuites, désordres divers). En revanche, la sécurité (c'est à dire sa résistance) n'est pas remise en cause. Les conditions de bon fonctionnement de la structure ont été atteintes. La durabilité de la structure est remise en cause.

**Serviceability Limit State:** When the serviceability limit state is reached, the structure's suitability for use (cracks, leaks, various disorders) is called into question. However, safety (i.e., its strength) is not compromised. The conditions under which the structure functions properly have been reached. The durability of the structure has been called into question.

- État limite d'ouverture de fissures : risque d'ouverture de fissures. Durabilité des ouvrages.
- Cracking limit state: risk of crack formation. Durability of structures.
- État limite de compression du béton : on limite volontairement la contrainte de compression à une valeur raisonnable.
- Concrete compression limit state: the compressive stress is intentionally limited to a reasonable value.
- État limite de déformation : flèche maximale. Limitation des désordres.
- Deformation limit state: maximum deflection. Limitation of deformations.

- **État limite ultime (ELU)**: Le dépassement de cet état conduit à la ruine de la structure. Au-delà de l'état limite ultime, la résistance des matériaux béton et acier est atteinte, la sécurité n'est plus garantie et la structure risque de s'effondrer.

**Ultimate Limit State (ULS)** : Exceeding this state leads to the collapse of the structure. Beyond the ultimate limit state, the strength of concrete and steel materials is reached, safety is no longer guaranteed, and the structure is at risk of collapsing.

- État limite de l'équilibre statique. Stabilité des constructions.
- Static equilibrium limit state: stability of constructions,

- État limite de résistance de l'un des matériaux. Non rupture par écrasement ou par allongement excessif.
- Material strength limit state: no failure due to crushing or excessive elongation,
- État limite de stabilité de forme : flambement.
- Form stability limit state: buckling.

**Combinaisons de calculs à l'ELU :** Combinations of calculations for ULS:

- ✓ La résistance des matériaux. Material strength
- ✓ L'équilibre statique. Static equilibrium
- ✓ Stabilité de forme. Form stability

**Combinaison d'actions à l'ELS :** Combination of actions for SLS:

- ✓ Résistance du béton. Concrete strength
- ✓ Ouverture des fissures. Crack opening
- ✓ Déformation. Deformation

## ACTIONS – SOLICITATIONS

**Actions :**

- actions permanentes « G » Permanent actions "G"
- actions d'exploitation « Q » Operating actions "Q"

- Surcharges d'exploitation, Operating overloads
- Surcharges climatiques (vent, neige), Climatic loads (wind, snow)
- Effet de la température, Temperature effect
- Surcharges placées pour l'exécution des travaux, Loads applied during construction

Poussées, pression partielle, solide/liquide (niveau varie considérablement). Thrusts, partial pressure, solid/liquid (level varies significantly)

- actions accidentelles Accidental actions

- ✓ Séisme, Earthquake
- ✓ Explosion, Explosion
- ✓ Incendie, Fire
- ✓ Choc des véhicules sur les piles d'un pont, Vehicle impact on bridge piers

**Sollicitations : Solicitations:**

M = moment fléchissant, Bending moment

V = effort tranchant, Shear force

N = effort normal, Normal force

T = moment de torsion. Torsional moment

Pour les calculer, on utilise la RDM, la méthode des éléments finis (logiciels) ou les méthodes spécifiques aux éléments Béton armé.

To calculate these solicitations, we use the resistance of materials, the finite element method (software) or methods specific to reinforced concrete elements.

Par mesure de simplification, dans les calculs courants, la résistance à la traction du béton est négligée. Les aciers longitudinaux reprennent seuls l'effort de traction (le béton n'a qu'une fonction d'enrobage).

For simplification in common calculations, the tensile strength of concrete is neglected. Longitudinal steel reinforcement alone carries the tensile force (the concrete serves as a protective cover).

## MÉTHODOLOGIE DE CALCUL

### **Objectif du calcul**

L'objectif de tout calcul est de définir les dimensions du coffrage ainsi que le ferraillage de tous les éléments d'une construction en béton armé.

### **Objective of the Calculation**

The objective of any calculation is to define the dimensions of the formwork and the reinforcement for all elements of a reinforced concrete construction.

### **Dimensionnement / Vérification**

La notion d'états limites introduit un nombre important de conditions. Il faut en effet s'assurer que l'élément de structure étudié satisfasse les conditions imposées par l'ELS mais aussi par l'ELU. C'est pourquoi, le calcul de béton armé est basé sur le principe du dimensionnement / vérification.

Dans un premier temps, une phase de dimensionnement va permettre de déterminer une première valeur de section d'acières. Ce dimensionnement résulte de l'application d'une seule des dispositions réglementaires. Dans un deuxième temps, on vérifie que toutes les conditions réglementaires sont satisfaites.

Ainsi dans le cas général, si le dimensionnement exploite une condition de l'ELS, la vérification sera réalisée avec les conditions de l'ELU ou vice-versa.

### **Design / Verification**

The concept of limit states introduces a large number of conditions. It is necessary to ensure that the structural element under study satisfies the conditions imposed by the SLS, but also by the ULS. This is why reinforced concrete design is based on the principle of design/verification.

Initially, a design phase is used to determine an initial value for the steel cross-section. This dimensioning results from the application of one of the regulatory provisions. Secondly, we check that all the regulatory conditions have been met.

Thus, in the general case, if the design uses an SLS condition, the verification will be carried out using ULS conditions, or vice versa.

### **Modalités de calcul d'un élément en béton armé : Procedure for the Calculation of a Reinforced Concrete Element**

1. Évaluation des actions et des combinaisons d'actions, **Evaluation of loads and load combinations**
2. Détermination d'un prédimensionnement de départ, **Initial preliminary sizing**
3. Étude de résistance des matériaux :  $N$ ,  $V$  et  $M$  et déformations en toute section de l'élément considéré, **Structural analysis: Calculate forces N (normal), V (shear), and M (bending moment), as well as deformations at any section of the considered element**
4. Détermination des courbes enveloppes et déduction des « sections dangereuses » (valeurs maximales des sollicitations), **Determination of envelope curves and deduction of ‘dangerous sections’ (maximum solicitations values)**
5. Dimensionnement au droit de ces « sections dangereuses » des sections d'armatures à l'ELS (ou l'ELU), **Dimensioning of reinforcement sections at SLS (or ULS) at these ‘dangerous sections’**,
6. Vérification de ces mêmes sections d'armatures à l'ELU (ou l'ELS) et vérification de la capacité du béton à équilibrer les efforts repris dans les aciers avec le prédimensionnement choisi. (Si **incompatibilité** => modification du prédimensionnement et retour à la case 1)

départ), Checking these same sections of reinforcement at the ULS (or SLS) and checking the capacity of the concrete to balance the forces in the reinforcement with the pre-dimensioning chosen. (If incompatible, modify the design and go back to square one).

7. Vérification des déformations sous sollicitations, Checking deformations under stress
8. Établissement des plans d'exécution : ferraillages/coffrages. Drawing up execution plans: reinforcement/formwork (coffrage).

### COMPORTEMENT DES STRUCTURES

Les structures de béton armé ne suivent les lois d'élasticité linéaire que sous faibles charges de courte durée d'application. Le comportement non-linéaire des éléments de béton armé hétérogènes de fait s'explique par :

Reinforced concrete structures do not adhere to the laws of linear elasticity except under low loads of short duration. The non-linear behavior of heterogeneous reinforced concrete elements can be explained by:

- ✓ La non-linéarité des diagrammes contrainte-déformation du matériau béton, Non-linearity of stress-strain diagrams for concrete material
- ✓ Le fluege du béton sous charge constante de longue durée d'application, Creep of concrete under constant long-term loads
- ✓ La fissuration du béton tendu, Cracking of tensioned concrete
- ✓ La plastification du béton et des armatures, The plasticising of concrete and reinforcement
- ✓ Le flambement des éléments élancés. The buckling of slender elements

La loi de Hooke est rarement valable. Donc en appliquant les méthodes de la RDM, on prendra des précautions qui tiennent compte de la spécificité des éléments en béton armé, ce qui a donné naissance à des méthodes dites **forfaitaires ou spécifiques aux structures en béton armé**.

Hooke's law is rarely applicable. Therefore, when applying methods of Strength of Materials (Résistance des Matériaux), precautions are taken to account for the specific characteristics of reinforced concrete elements. This has led to the development of methods known as empirical or specific to reinforced concrete structures.

Le calcul des structures B-A comprend les deux étapes suivantes :

- L'analyse qui consiste à déterminer les efforts internes qui sollicitent la structure,
- Le dimensionnement qui a deux buts :
  - ✓ Soit déterminer les dimensions les dimensions des éléments des éléments béton et les quantités d'acier nécessaires,
  - ✓ Soit vérifier si les dimensions B-A définies préalablement sont suffisantes.

The calculation of reinforced concrete structures involves the following two steps:

- Analysis, which determines the internal forces that act on the structure;
- Design, which serves two purposes:
  - ✓ To determine the dimensions of concrete elements and the quantities of steel required.
  - ✓ To verify if the previously defined dimensions for reinforced concrete elements are adequate.

Ces deux étapes peuvent être effectuées, soit par un calcul linéaire (théorie de l'élasticité linéaire), soit par un calcul non-linéaire, soit enfin par une combinaison des deux.

These two steps can be carried out either by a linear calculation (linear elasticity theory), or by a non-linear calculation, or a combination of both.

Méthode	Calcul linéaire linear calculation	Calcul non-linéaire non-linear calculation
1	Analyse Analysis	Dimensionnement Design
2		Analyse Analysis
3		Analyse Analysis

Trois approches principales sont utilisées dans le calcul des structures en béton armé : There are three main approaches used in the calculation of reinforced concrete structures

- La première utilisée avec le concept des contraintes admissibles a le mérite d'être claire et simple, elle présente quelques lacunes importantes : The first approach, based on the concept of permissible stresses, has the merit of being clear and simple, but it has a number of major limitations
  - Le comportement du béton n'est pas idéalement élastique, The behaviour of concrete is not ideally elastic
  - Les contraintes sous charges de service ne donnent pas d'indication directe de la sécurité de l'ensemble de la structure, the Stresses under service loads do not provide a direct indication of the overall safety of the structure

C'est pour ces raisons que le concept des contraintes admissibles n'apparaît plus dans les normes modernes. Cependant, lorsqu'il s'agit de limiter les déformations à l'état de service, on a souvent recours à la notion de comportement élastique d'une structure.

For these reasons, the concept of permissible stresses is no longer appears in modern standards. However, when it comes to limiting deformations in the service state, the notion of elastic behavior of a structure is often used.

- La deuxième est hybride, dans la mesure où elle se base d'une part sur la théorie de l'élasticité pour l'analyse et d'autre part sur le calcul non-linéaire pour le dimensionnement. De ce fait, cette méthode présente une certaine incohérence. Toutefois, elle donne toujours des résultats du côté de la sécurité. Pour éviter cette contradiction on procède par : The second is hybrid, in that it is based on the theory of elasticity for analysis and on non-linear calculation for dimensioning. As a result, this method is somewhat inconsistent. However, it always gives results on the safety side. To avoid this contradiction, we proceed by :
  - L'introduction de valeurs plus exactes des raideurs EI tenant compte des effets de la fissuration et du fluage du béton permet une amélioration des méthodes de calcul en élasticité, The introduction of more accurate values for EI stiffness, taking into account the effects of cracking and creep in concrete, has led to an improvement in elasticity calculation methods
  - Une redistribution des moments calculés élastiquement et ce en se basant sur la pratique et les essais. A redistribution of the moments calculated elastically, based on practice and tests

- La troisième méthode permet de cerner le comportement du système statique global jusqu'à l'état ultime, donc de déterminer la sécurité de la structure. Dans ce cas, l'on se contente de déterminer les charges ultimes Qu du système. La théorie de la plasticité est sans doute la méthode la plus simple.  $\beta Q_{\text{service}} \leq Q_{\text{ultime}}$  ( $\beta$  étant le coefficient de sécurité). Cette méthode est très indiquée pour les structures en B-A.

The third method aims to understand the behaviour of the overall static system up to the ultimate state, thus determining the safety of the structure. In this case, the goal is to determine the ultimate loads (Qu) for the system. Plasticity theory is one of the simplest methods for this purpose. It involves comparing the service loads to the ultimate loads using a safety factor. This method is well-suited for reinforced concrete structures.

De tout ce que nous venons de voir plus haut, il est logique de vérifier l'aptitude au service à l'aide d'un calcul élastique qui peut permettre de tenir compte même de manière approximative des phénomènes non-linéaires tels que la fissuration et les effets différés (retrait et fluage).

Given the above approaches, it is reasonable to assess the serviceability using an elastic analysis that can approximate non-linear phenomena such as cracking and delayed effects (shrinkage and creep).

## TYPES DE STRUCTURES EN BÉTON ARMÉ

Le béton armé est un matériau de construction polyvalent utilisé dans divers types de structures. Ces structures sont généralement classées en fonction de plusieurs critères : Reinforced concrete is a versatile construction material used in various types of structures. These structures are typically classified based on several criteria

### Système porteur : Load-Bearing System

- Poutres : éléments horizontaux qui supportent des charges et transmettent ces charges aux colonnes. Beams: horizontal elements that support loads and transmit them to columns
- Colonnes : éléments verticaux qui supportent des charges verticales et assurent la stabilité de la structure. Columns: vertical elements that support vertical loads and provide structural stability
- Tirants : éléments tendus qui résistent à la traction. Tie rods: tensioned elements that resist traction
- Cadres : assemblages de poutres et de colonnes qui forment une structure en treillis. Frames: assemblies of beams and columns forming a structure
- Arcs : éléments courbes qui supportent des charges en compression. Arches: curved elements that support compressive loads
- Dalles : éléments plats et minces qui forment la surface horizontale d'un bâtiment. Slabs: flat and thin elements forming the horizontal surface of a building
- Parois porteuses : murs qui contribuent à la stabilité latérale de la structure. Load-Bearing Walls: walls contributing to lateral stability of the structure
- Voiles : murs minces. Shear Walls: thin walls
- Poutres cloisons : poutres intégrées dans des murs pour renforcer la structure. Partition Beams: beams integrated into walls to reinforce the structure
- Semelles de fondations : éléments situés en dessous des colonnes pour répartir la charge sur le sol. Foundation footings: elements located below the columns to distribute the loads on the ground.
- Barrages : structures utilisées pour retenir l'eau. Dams: structures used for retaining water
- Radiers : dalles épaisse qui transfèrent la charge sur le sol dans les fondations de bâtiments. Rafts: thick slabs that transfer the loads to the ground in the foundations of buildings.

- Pieux : éléments enfouis dans le sol pour soutenir une structure. **Piles:** elements driven into the ground to support a structure

### Section : Section

- Pleine : une section en béton massif sans ouvertures. **Solid:** a solid concrete section without openings
- En T : une section en forme de T inversé, souvent utilisée pour les poutres et les dalles. **T-shaped:** a cross-section in the shape of an inverted T, often used for beams and slabs
- En I : une section en forme de I, utilisée pour les poutres et les colonnes. **I-shaped:** an I-shaped section, used for beams and columns
- Creuse : une section avec des ouvertures ou des vides, utilisée pour réduire le poids de la structure tout en conservant la résistance. **Hollow:** a section with openings or voids, used to reduce the weight of the structure while maintaining strength

### Méthode de réalisation : Construction Method

- Béton coulé sur place : le béton est mélangé et coulé sur le chantier pour former la structure. **Cast-in-place concrete:** the concrete is mixed and poured on site to form the structure.
- Structures préfabriquées en usine : les éléments en béton sont fabriqués en usine puis transportés sur le chantier pour être assemblés. **Factory Prefabricated Structures:** concrete elements are manufactured in a factory and transported to the construction site for assembly
- Structures préfabriquées sur chantier : les éléments en béton sont préfabriqués sur place, à proximité du chantier, puis assemblés. **On-Site Prefabricated Structures:** concrete elements are prefabricated on-site or near the construction site and then assembled
- Mode mixte : une combinaison de méthodes de construction est utilisée pour créer la structure, par exemple en utilisant des éléments préfabriqués et du béton coulé sur place. **Hybrid Approach:** a combination of construction methods used to create the structure, such as using prefabricated elements along with cast-in-place concrete

Ces différentes classifications permettent de concevoir et de construire des structures en béton armé adaptées à une grande variété d'applications et d'exigences spécifiques.

These different classifications enable the design and construction of reinforced concrete structures tailored to a wide range of applications and specific requirements.