

Chapitre 3 : Adhérence et ancrage

3.1. Définition et Rôle crucial de l'adhérence

L'adhérence désigne l'ensemble des forces de liaison qui se développent à l'interface entre l'acier d'armature et le béton qui l'enrobe. Ces forces s'opposent au glissement relatif de la barre d'acier par rapport à la matrice de béton.

Cette adhérence est essentielle pour valider une hypothèse clé du calcul des structures en béton armé : l'absence de glissement entre l'acier et le béton. Cela se traduit par l'égalité des déformations dans les deux matériaux au même point ($\varepsilon_b = \varepsilon_s$), où ε_b est la déformation du béton et ε_s est la déformation de l'acier.

L'adhérence permet la transmission efficace des efforts (principalement de traction) du béton vers les armatures, et vice-versa, assurant ainsi le comportement composite du matériau béton armé. Sans adhérence, l'acier et le béton travailleraient indépendamment, annulant l'intérêt du béton armé.

3.2. Origines physiques de l'Adhérence

L'adhérence résulte de la combinaison de trois mécanismes distincts, dont l'importance relative varie selon le type d'armature :

3.2.1. Adhérence Chimique (Collage) :

Forces d'attraction moléculaire (type Van der Waals) à l'interface acier-béton, généralement faible et peu fiable. Cette adhésion initiale est rapidement perdue dès l'apparition de micro-glissements ou sous l'effet de charges cycliques, d'humidité, ou de variations thermiques.

Rôle : Principalement significatif avant la mise en charge ou pour des barres très lisses, mais négligeable en service pour la résistance globale.

3.2.2. Adhérence par Frottement :

Forces résultant du **contact mécanique** entre la surface de l'acier et le béton, dues aux micro-irrégularités naturelles présentes même sur des barres dites "lisses". Plus significative que l'adhérence chimique, mais limitée. Elle dépend fortement de la rugosité naturelle de l'acier et de la contrainte de serrage transversale exercée par le béton durci (ou par des armatures transversales).

3.2.3. Adhérence par engrenement mécanique (Emboutissement) :

Forces générées par l'interpénétration mécanique entre les nervures (saillies périodiques) des barres à Haute Adhérence (HA) et le béton environnant. Les nervures agissent comme des "clavettes" s'appuyant sur le béton. Cet engrenement mobilise directement la résistance du béton en compression (devant les nervures) et en cisaillement (dans les zones de béton situées entre les nervures et en périphérie de la barre). Des micro-fissures de cisaillement radiales apparaissent naturellement autour de la barre.

3.3. Modes de rupture liée à l'adhérence (Fig. 3.1)

Lorsqu'une barre ancrée dans le béton est soumise à un effort de traction croissant, trois types de ruptures peuvent survenir, reflétant différents niveaux d'efficacité de l'adhérence et de l'ancrage :

3.3.1. Rupture par traction de l'acier :

La barre d'acier atteint sa limite élastique (f_e) ou sa résistance à la rupture (f_u) et se rompt *avant* que l'adhérence ne soit vaincue ou que le béton ne soit endommagé.

C'est la situation idéale, qualifiée d'"**ancrage parfait**". Elle signifie que la longueur d'ancrage (L_b) est suffisamment longue pour permettre à l'acier de développer toute sa capacité portante sans défaillance de l'interface ou du béton environnant. L'adhérence est pleinement efficace.

3.3.2. Glissement de la barre (Arrachement) :

Les forces d'adhérence (quel que soit le mécanisme principal - chimique, frottement ou engrènement) sont dépassées, entraînant le glissement progressif de la barre dans sa gaine de béton.

L'adhérence est insuffisante pour résister à l'effort appliqué. Cela indique généralement une longueur d'ancrage trop courte, une résistance du béton trop faible, ou une qualité d'adhérence médiocre (barres lisses, béton mal compacté, etc.). C'est un mode de rupture fragile et dangereux à éviter.

3.3.3. Arrachement d'un cône de béton (Fendage) :

Sous l'effet des forces d'engrènement (pour les barres HA), les contraintes de cisaillement et de traction induites dans le béton autour de l'extrémité de la barre deviennent trop importantes. Il en résulte la rupture du béton selon une surface conique ou prismatique, entraînant un bloc de béton ("cône d'arrachement") avec la barre.

Bien que l'adhérence par engrènement soit active, la résistance du béton environnant est dépassée. Ce mode est favorisé par un enrobage insuffisant (distance entre la barre et la surface libre du béton trop faible), une résistance du béton faible, ou l'absence d'armatures transversales (cadres, étriers) qui pourraient confiner le béton et empêcher ce fendage.

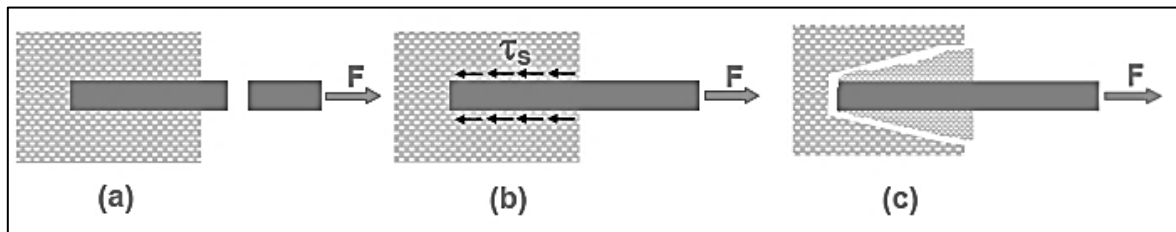


Figure. 3.1 : Types de ruptures dans un essai d'arrachement d'une barre scellée dans un massif en béton.

3.4. Facteurs influençant l'adhérence Acier-Béton

La qualité et la résistance de l'adhérence dépendent de nombreux paramètres :

- **État de Surface des Barres** : Les barres rugueuses (HA) offrent une meilleure adhérence par engrènement que les barres lisses (reliant principalement sur le frottement).
- **Forme des Barres** : Le profil des nervures (hauteur, inclinaison, espacement) sur les barres HA est crucial pour optimiser l'engrènement et limiter les contraintes de cisaillement dans le béton.
- **Groupement d'Armatures** : Des barres trop rapprochées (en paquet ou mal espacées) réduisent la surface d'interface béton-acier par barre et peuvent conduire à un fendage prématuré du béton entre les barres.
- **Résistance du Béton (f_{cj} ou f_{c28})** : C'est un facteur majeur, surtout pour l'adhérence par engrènement et la résistance au fendage. Plus le béton est résistant, meilleure est l'adhérence et plus la résistance au cône d'arrachement est élevée.

- **Compression Transversale (Serrage) :** Une contrainte de compression perpendiculaire à la barre (due à la réaction d'appui, à la précontrainte, ou à des armatures transversales serrées) augmente significativement l'adhérence par frottement et confinement du béton, améliorant la résistance à l'arrachement et au fendage.
- **Épaisseur d'Enrobage (Distance à la Surface Libre) :** Un enrobage suffisant est vital pour :
 - Protéger l'acier de la corrosion.
 - Fournir assez de béton autour de la barre pour développer les forces d'engrènement sans provoquer un fendage prématuré vers la surface libre.
 - Assurer un bon confinement. Un enrobage trop faible favorise la rupture par cône d'arrachement.

3.5. La Contrainte d'Adhérence (τ_s) : Mesure Locale de la Liaison Acier-Béton

L'intensité de la liaison mécanique entre une armature et le béton qui l'enrobe est quantifiée par une grandeur locale appelée contrainte d'adhérence, notée τ_s . Cette contrainte représente la force d'adhérence par unité de surface de contact développée le long de l'interface acier-béton.

La contrainte d'adhérence moyenne sur une longueur infinitésimale dx d'une barre est définie par la relation :

$$\tau_s = \frac{\left(\frac{dF}{dx}\right)}{u} \quad (\text{Eq.3.1})$$

ou :

dF/dx (N/m ou kN/m) : C'est le gradient d'effort axial dans l'armature. Il représente la variation de l'effort de traction F le long de la barre par unité de longueur x . Physiquement, si l'effort de traction diminue le long de la barre ($dF/dx < 0$), c'est que cet effort est "transmis" au béton environnant via l'adhérence. La valeur absolue $|dF/dx|$ est donc directement proportionnelle à l'intensité de la force d'adhérence sur la longueur dx .

u (m) : C'est le périmètre utile de la section d'acier en contact avec le béton.

- Pour une barre isolée de diamètre $\emptyset$: $u = \pi \cdot \emptyset$
- Pour un paquet de barres (généralement limité à 2 ou 3 barres identiques en contact): u est le périmètre de l'enveloppe convexe (filet) du paquet. *Exemple :* Pour 2 barres côte à côte de diamètre $\emptyset$, $u \approx 2 \cdot \emptyset + \pi \cdot \emptyset$ (périmètre extérieur du "8" formé par les deux cercles).

τ_s (MPa ou N/mm²) : La contrainte d'adhérence résultante, exprimée en contrainte (force/surface). C'est la force d'adhérence par unité de surface de l'interface.

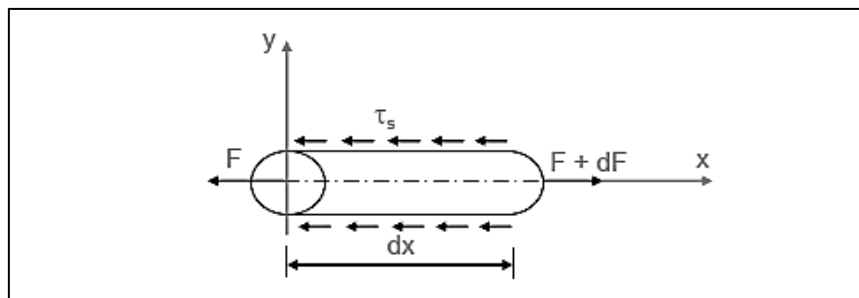


Figure. 3.2. Equilibre d'un tronçon de barre de longueur dx

3.5. 1. Interprétation Physique Détaillée:

- **Transfert d'Effort :**

Imaginons une barre encastrée dans le béton et soumise à un effort de traction F à une de ses extrémités (Figure. 3.2). Pour qu'une section de barre située à une distance x de cette extrémité soit en équilibre, l'effort $F(x)$ qu'elle subit doit être équilibré par la somme des forces d'adhérence développées entre cette section et l'extrémité libre. Si F diminue le long de la barre, c'est que les forces d'adhérence s'opposent au glissement de la barre vers la gauche.

- **Rôle du Périmètre (u) :**

La force d'adhérence totale sur une longueur dx est égale à $\tau_s \cdot (u \cdot dx)$ (contrainte $\times$ surface de contact). Cette force doit équilibrer la variation d'effort axial dF sur cette même longueur : $dF = \tau_s \cdot u \cdot dx$. En réarrangeant, on obtient $\tau_s = (dF/dx)/u$. Le périmètre u est donc crucial : plus la surface de contact est grande (u grand), plus la contrainte d'adhérence τ_s nécessaire pour équilibrer un gradient d'effort dF/dx donné est faible.

3.5. 2. Importance Pratique dans le Calcul des Structures :

- **Dimensionnement des Ancrages et des Jonctions :**

La contrainte d'adhérence τ_s est la grandeur clé pour calculer la longueur d'ancrage nécessaire (L_b) pour qu'une barre puisse développer sa résistance maximale ($A_s \cdot f_{su}$) sans arrachement. Plus la contrainte d'adhérence admissible τ_{su} est faible, plus la longueur d'ancrage requise est grande.

- **Vérification des Contraintes Locales :**

Dans les zones de forte variation d'effort (autour des appuis, aux jonctions de barres), la contrainte d'adhérence effective τ_s doit être vérifiée pour rester inférieure à une valeur limite τ_{su} définie par les normes (BAEL, etc.) afin d'éviter le glissement ou le fendage du béton.

- **Détermination de τ_{su} par les Normes :**

Les normes de calcul fournissent des formules pour la contrainte d'adhérence de calcul ultime (τ_{su}). Cette valeur dépend principalement de :

- La résistance caractéristique en traction du béton (f_{cj}).
- L'état de surface de la barre (lisse ou HA).
- Le diamètre de la barre (effet d'échelle : adhérence relative meilleure pour les petits diamètres).
- La position de la barre durant le bétonnage (bonnes ou mauvaises conditions).
- La présence de compression transversale.

3.6. Contrainte limite d'adhérence

La contrainte limite d'adhérence (τ_{su}) représente la valeur maximale que la contrainte de cisaillement à l'interface acier-béton ne doit pas dépasser pour garantir un ancrage fiable. Son objectif est d'empêcher tout glissement de la barre d'armature à l'intérieur de la gaine de béton qui l'enserme, préservant ainsi l'intégrité du lien entre les deux matériaux. Cette valeur limite est calculée par la formule suivante :

$$\tau_{su} = 0.6 \cdot \psi_s^2 \cdot f_{tj} \quad (\text{Eq.3.2})$$

où chaque paramètre joue un rôle critique.

Le coefficient 0.6 est un facteur de sécurité global, issu de l'analyse expérimentale et de modélisations, qui intègre la variabilité des propriétés des matériaux et les incertitudes liées à la transmission des efforts.

Le terme ψ_s^2 , appelé coefficient de scellement, dépend directement de la nature de la surface de l'acier : il vaut 1 pour les aciers lisses (offrant une adhérence principalement par frottement) et 1.5 pour les aciers à haute adhérence (HA) (dont les aspérités génèrent un engrènement mécanique plus efficace mobilisant la résistance du béton).

Enfin, f_{tj} désigne la résistance caractéristique à la traction du béton à j jours, exprimée en MPa. Cette dernière est elle-même estimée à partir de la résistance en compression du béton (f_{cj}) via la relation suivante :

$$f_{tj} = 0.6 + 0.06 \cdot f_{cj} \quad (\text{Eq.3.3})$$

Cette formule empirique (f_{tj}) traduit le fait que la résistance à la traction du béton est bien inférieure à sa résistance en compression (typiquement $\sim 10\%$) et évolue proportionnellement avec elle ; le terme constant (0.6) et le coefficient (0.06) sont calibrés sur des essais standardisés, comme l'essai de traction par fendage. En résumé, la formule τ_{sutsu} lie explicitement la résistance admissible à l'arrachement de la barre à la rugosité de l'acier (ψ_s) et à la résistance à la traction du béton environnant (f_{tj}), elle-même dérivée de sa résistance en compression (f_{cj}). Le non-respect de cette limite risque de provoquer un glissement de l'armature ou l'arrachement localisé du béton, compromettant la capacité portante de l'élément structurel.

3.7. Ancrage des aciers

Un ancrage est considéré comme efficace lorsqu'une barre d'acier, sollicitée en traction, transmet intégralement son effort au béton environnant par le biais des forces d'adhérence sur toute la longueur de la zone d'ancrage, sans glissement ni rupture.

3.7.1 Ancrage droit

La longueur de scellement droit (l_s) représente la longueur minimale nécessaire pour ancrer une barre de diamètre ϕ soumise à un effort de traction maximal correspondant à sa limite élastique (f_e). Cette longueur est déterminée par l'équilibre entre la force de traction dans l'acier et la force résistante due à l'adhérence sur la surface de contact.

L'équation fondamentale s'établit comme suit :

La force de traction maximale est donnée par l'équation suivante :

$$F_{\text{traction}} = \frac{\pi \cdot \phi^2 \cdot f_e}{4} \quad (\text{Eq.3.4})$$

La force d'adhérence totale :

$$F_{\text{adhérence}} = \pi \phi \cdot l_s \cdot \tau_{\text{su}} \quad (\text{Eq.3.5})$$

où

τ_{su} est la contrainte limite d'adhérence définie précédemment.

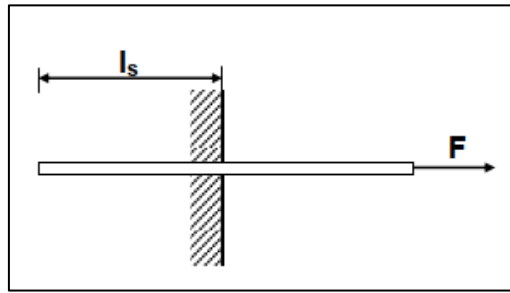


Figure. 3.3. Ancrage droit

En résolvant l'égalité des équations (Eq.3.4 et Eq.3.5), on obtient la relation suivante :

$$l_s = \frac{\phi \cdot f_e}{4\tau_{su}} \quad (\text{Eq.3.7})$$

Cette formule révèle que l_s est proportionnelle au diamètre de la barre (ϕ) et à la limite élastique de l'acier (f_e), mais inversement proportionnelle à la contrainte d'adhérence (τ_{su}).

Physiquement, cela s'explique par le fait qu'une barre plus épaisse ou plus résistante nécessite une surface de contact plus grande pour transmettre un effort accru, tandis qu'une adhérence béton-acier plus forte réduit la longueur requise.

Le facteur $1/4$ provient du rapport géométrique entre l'aire de la section transversale de l'acier ($\frac{\pi\phi^2}{4}$) et sa surface latérale par unité de longueur ($\pi\phi$).

À défaut de calcul précis, les normes recommandent des longueurs forfaitaires :

- **40 ϕ pour les aciers HA Fe E 400** (où $f_e=400$ MPa).
- **50 ϕ pour les aciers HA Fe E 500** ($f_e=500$ MPa) ou **les aciers lisses** (Fe E 215/235).

Ces valeurs intègrent implicitement un coefficient de sécurité (généralement $\gamma_s=1.15$) et supposent un coefficient de scellement $\psi_s \geq 1.5$ pour les aciers HA. Elles simplifient le dimensionnement tout en garantissant une marge contre le glissement ou l'arrachement, couvrant également les effets défavorables comme le regroupement de barres ou les variations locales de résistance du béton.

3.7.2 Longueur de scellement droit dans le cas d'un paquet de barres

Bien que les barres d'acier puissent être regroupées en paquets pour des raisons pratiques (optimisation de l'encombrement ou facilitation du ferrailage), leur ancrage doit impérativement être réalisé individuellement (selon les prescriptions de l'article A 6.1.21 des Règles BAEL). Cette exigence fondamentale découle de trois phénomènes mécaniques critiques:

3.7.2.1. Concentration des contraintes d'adhérence :

Dans un paquet, les barres centrales sont partiellement "masquées" par les barres périphériques, limitant le contact direct entre leur surface et le béton frais. Cette configuration réduit localement la surface d'interface effective disponible pour l'adhérence, créant des zones de faiblesse où les contraintes de cisaillement peuvent dépasser la valeur limite τ_{su} .

3.7.2.2. Risque de fissuration prématurée :

Lors du serrage des armatures, le béton peine à pénétrer uniformément entre les barres rapprochées. Il en résulte des vides ou des zones moins compactées, favorisant l'apparition

de fissures radiales sous chargement (phénomène amplifié par la "bielle de béton" écrasée entre les barres).

3.7.2.3. Glissement collectif :

Si les barres sont ancrées comme un seul bloc, une défaillance localisée de l'adhérence peut provoquer un décollement en chaîne de l'ensemble du paquet, compromettant brutalement la capacité portante de l'élément structural.

La figure 3.4 présente la longueur d'ancrage de paquet de barres

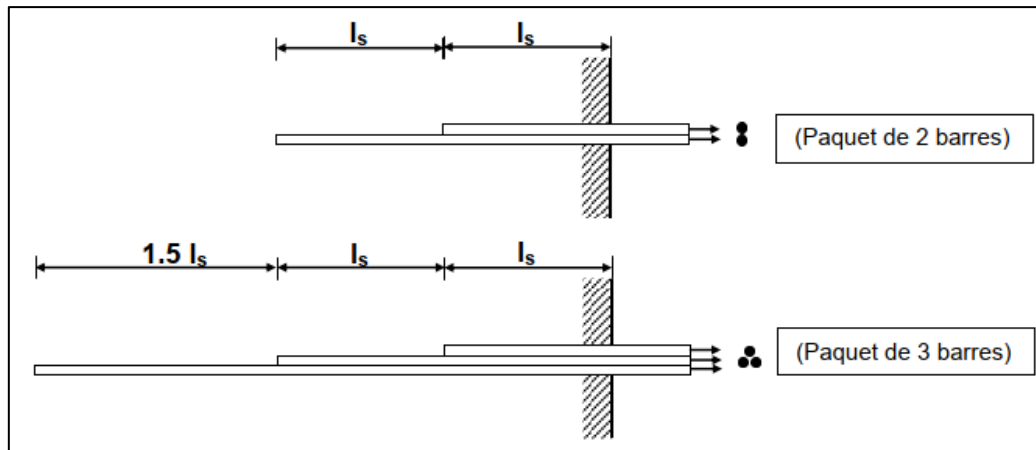


Figure. 3.4 : Ancrage droit dans le cas de paquet de 2 ou 3 barres

3.7.3. Ancrage Courbe (ou par Crochet):

Lorsque l'espace disponible aux extrémités d'un élément structural (comme un appui de poutre) est insuffisant pour réaliser un ancrage droit de longueur totale l_s (longueur de scellement droit requise), un ancrage courbe est mis en œuvre. Cette solution optimise l'encombrement tout en garantissant l'adhérence de l'armature dans le béton. Un ancrage courbe se décompose en trois parties distinctes (cf. Figure.3.5) :

- **Segment droit initial (AB) :**

Longueur notée ℓ_2 : Assure la transition entre la partie libre de l'armature et la courbure.

- **Partie courbe (BC) :**

Arc de cercle défini par son rayon de courbure r et son angle au centre θ (généralement 90° , 135° ou 180° selon les normes). Il a pour rôle de répartir les contraintes d'adhérence sur la zone pliée et limite le risque de fissuration du béton.

- **Segment droit terminal (CD) :**

Longueur notée ℓ_1 (ou "retour droit"), ancrage final dans le béton, contribuant significativement à la résistance d'adhérence.

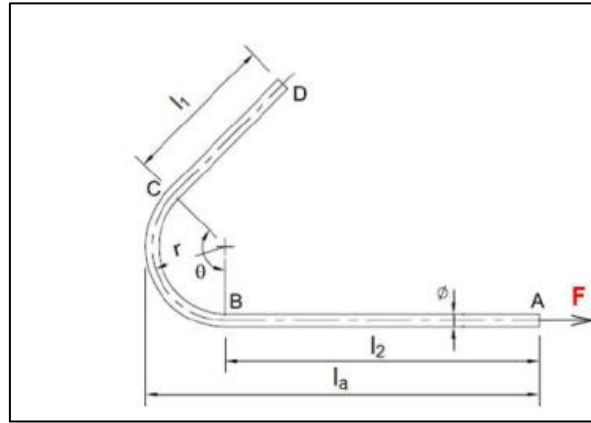


Figure. 3.5 : Ancrage courbe de barres tendues

3.7.3.1. Rayons de courbure minimaux (Norme BAEL A.6.1,25)

Le rayon de courbure minimal garantit l'intégrité de l'acier pendant le façonnage et limite les contraintes dans le béton. Les valeurs varient selon le type d'acier et la fonction de l'armature sont résumés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1. Rayon de courbure minimal garanti

type d'acier	Élément structural	Rayon minimal (r)	Justification
Barres rondes lisses	Crochets d'ancrage	$r \geq 3\phi$	Réduction du risque de fissuration (fragilité accrue des aciers lisses)
	Cadres/Étriers/Épingles	$r \geq 2\phi$	Contraintes mécaniques moindres (rôle secondaire en cisaillement)
Barres à haute adhérence (HA)	Crochets d'ancrage	$r \geq 2\phi$	Meilleure ductilité des aciers HA
	Cadres/Étriers	$r \geq 2\phi$	Standardisation et facilité de mise en œuvre

Exemple : Pour une barre HA de diamètre $\phi = 12$ mm, un crochet nécessite $r \geq 24$ mm.

3.7.3.2. Caractéristiques des crochets standards

La longueur équivalente ℓ_s convertit l'ancrage courbe en une longueur droite fictive offrant la même résistance d'adhérence. Elle dépend de l'angle θ et intègre (Tableau 3.2. et figure 3.6) :

- ℓ_1 : Segment droit terminal (CD)
- ℓ_2 : Segment droit initial (AB)
- r : Rayon de courbure.
- Coefficients : Multiplicateurs liés à l'effet de courbure (contribution mécanique accrue).

Tableau 3.2. Formules normatives (BAEL) des crochets avec ancrage courbe

Angle θ	Formule de ℓ_s	Explication physique
90° (Figure.3.6(a))	$\ell_s = 1.87\ell_1 + \ell_2 + 2.19r$	Ancrage minimal, effet de butée limité
120° (Figure.3.6(b))	$\ell_s = 2.31\ell_1 + \ell_2 + 3.28r$	Optimisation encombrement/résistance
135° (Figure.3.6(c))	$\ell_s = 2.57\ell_1 + \ell_2 + 3.92r$	Standard recommandé (équilibre performance/compactiez)
180° (Figure.3.6(d))	$\ell_s = 3.51\ell_1 + \ell_2 + 6.28r$	Ancrage maximal (effet de verrouillage mécanique)

- ℓ_s : Longueur de scellement droit équivalente (valeur minimale réglementaire).
- $6.28r$: Correspond à $2\pi r$ (périmètre complet du cercle), traduisant l'effet d'ancrage circulaire.

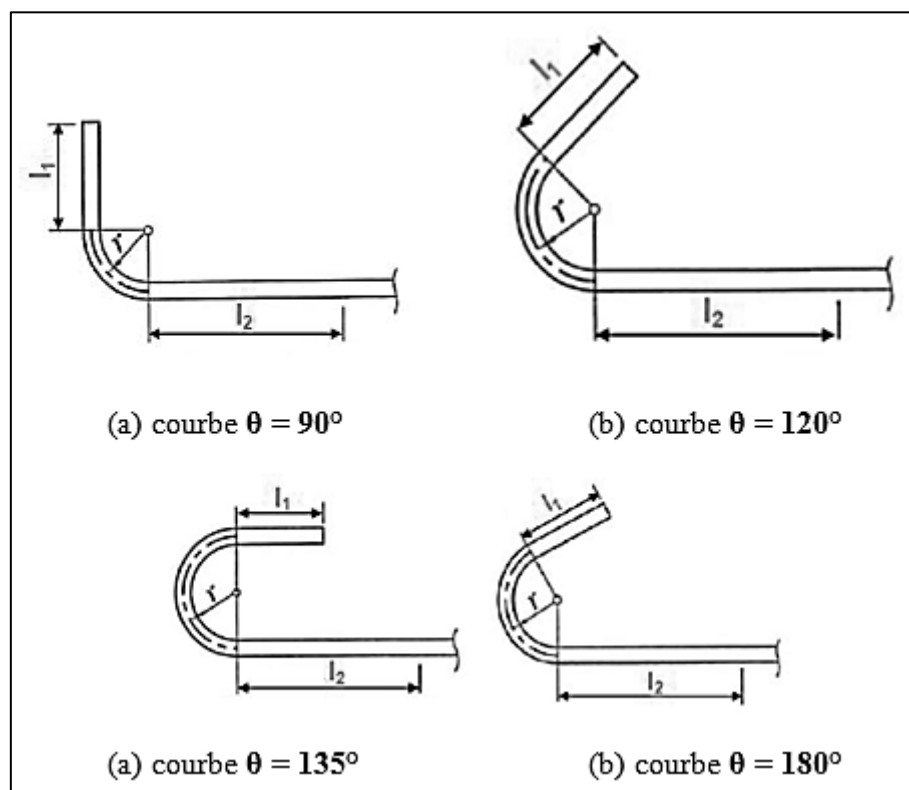


Figure. 3 .6. Caractéristiques des crochets standards avec ancrage courbe

Exemple:

Un crochet à 135° avec $r = 3\phi$, $\ell_1 = 4\phi$, $\ell_2 = 2\phi$ donne :

$$\ell_s = 2.57 \times 4\phi + 2\phi + 3.92 \times 3\phi = 10.28\phi + 2\phi + 11.76\phi = 24.04\phi$$

Soit une réduction d'environ 30% par rapport à un ancrage droit ($\ell_s \approx 40\phi$ pour un acier HA en C25).

3.7.4. Ancrage des cadres, étriers et épingles (BAEL A.6.1,255)

Pour les armatures transversales (cadres, étriers, épingles), l'ancrage est assuré par **courbure + retour droit**. La partie courbe crée un effet mécanique de verrouillage, tandis que le retour droit garantit la stabilité de l'ancrage dans le béton.

Les règles de conception sans résumés au tableau 3.3 et Figure 3.7 :

La courbure doit respecter les rayons minimaux ($r \geq 2\phi$).

Le plan de l'ancrage ne doit pas dévier de plus de $\pi/8$ (22.5°) par rapport au plan de l'armature principale.

Tableau. 3.3. Longueurs minimales des retours droits :

Angle de courbure	Longueur minimale du retour droit
180° (cintrage complet)	$\geq 5\phi$
135° (angle standard)	$\geq 10\phi$
90° (angle droit)	$\geq 15\phi$

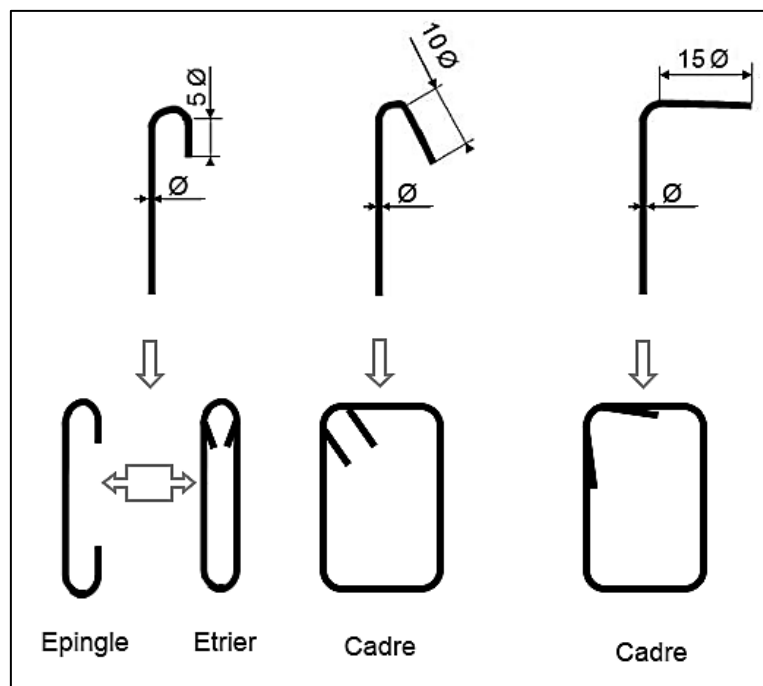


Figure. 3.7 : Ancrage des cadres, étriers et épingles

3.8. Recouvrements des armatures :

Les barres d'acier étant livrées en longueurs standards (généralement ≤ 12 m), les éléments structuraux de grande dimension nécessitent des **jonctions par recouvrement**. Cette technique assure la transmission continue des efforts (traction/compression) entre barres identiques sur une longueur spécifique notée l_r .

- **Principe de transfert** : Les efforts se transmettent par :
 - **Adhérence acier-béton** le long de l_r .
 - **Compression directe béton** (pour barres comprimées).
- **Risque majeur** : Une longueur l_r insuffisante provoque un arrachement ou un **glissement** des barres (*défaillance fragile*).

3.8.1 Barres rectilignes sans crochets

3.8.1.1 Barres tendues

a) Continuité par recouvrement simple

- **Condition d'espacement** : (Figure 3.8 et Tableau 3.4)

Tableau 3. 4. Recouvrement sans crochet

Cas	Distance entre axes (c)	Longueur l_r
Alignement serré	$c \leq 5\phi$	$l_r = l_s$
Barres écartées	$c > 5\phi$	$l_r = l_s + c$

• **Explication physique :**

- Si $c \leq 5\phi$, les **champs de contraintes** se superposent → efficacité maximale.
- Si $c > 5\phi$, un **effet de levier** apparaît → nécessite une longueur supplémentaire cc pour équilibrer les moments.

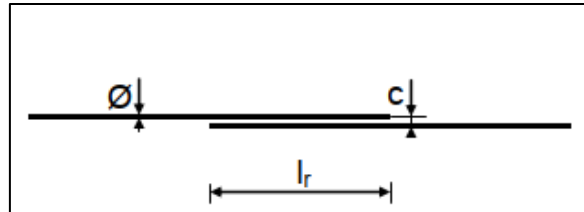


Figure. 3.8 : Simple recouvrement des extrémités des barres sans crochets

Exemple : Barre HA500 Ø16 ($l_s = 50\phi = 800$ mm) :

- $c = 60$ mm (3.75ϕ) → $l_r = 800$ mm
- $c = 100$ mm (6.25ϕ) → $l_r = 800 + 100 = 900$ mm

b) Recouvrement par couvre-joint

Les barres sont disposées côte à côte *sans contact direct*, créant une **zone de transfert dédoublée** (risque de fissuration réduit) (Figure 3.9).

$$l_r = 2.l_s$$

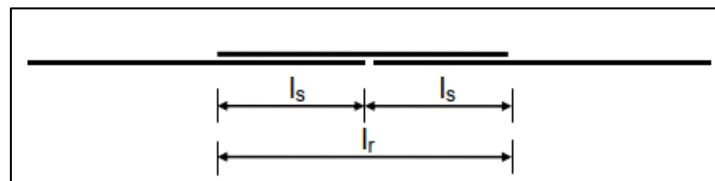


Fig. 3.9 : Recouvrement par couvre-joint

3.8.1.2 Barres comprimées

a) Continuité par recouvrement simple (Figure. 3.10)

- **Formule :** $l_r = 0.6.l_s$
 - La compression génère un frottement latéral accru acier-béton.
 - Le béton participe activement au transfert des efforts → réduction de 40% vs traction.

Valeurs pratiques (BAEL) :

FeE400 $l_r = 24\phi$

FeE500 $l_r = 30\phi$

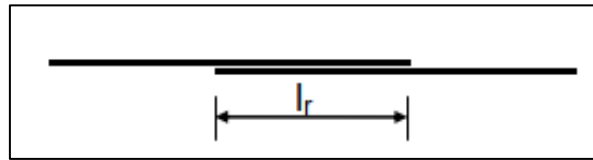


Fig. 3.10 : Simple recouvrement des extrémités des barres comprimées

3.8.1.3 Couture des jonctions (Armatures transversales de recouvrement)

Lorsqu'on réalise un recouvrement de barres parallèles, des contraintes de traction parasites apparaissent perpendiculairement à l'axe des barres. Ces contraintes risquent de provoquer un *éclatement du béton* le long de la jonction. La "couture" désigne les armatures transversales (cadres, étriers) qui confinent la zone et maintiennent l'intégrité de l'assemblage (Figure 3.11).

La résistance totale des armatures de couture doit satisfaire :

$$\sum A_t \cdot f_{et} \geq \sum A_s \cdot f_e$$

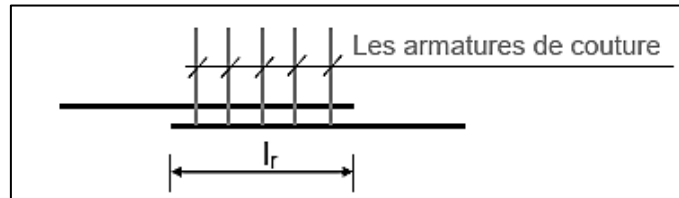


Figure. 3.11 : Couture des joints

Le diamètre des armatures de couture doit être choisi suffisamment petit pour assurer une bonne répartition de ces armatures tout au long de la jonction.

3.8.2 Recouvrement des barres rectilignes avec crochets normaux (BAEL)

Les crochets normaux optimisent l'ancrage et réduisent la longueur de recouvrement grâce à leur **effet mécanique de verrouillage**.

Géométrie du crochet normal (Figure. 3.12)

- **Rayon de courbure** : $r \geq 3\phi$ (ronds lisses) / $r \geq 2\phi$ (aciers HA)
- **Retour droit** : $\geq 5\phi$
- **Angle** : $\theta = 180^\circ$

Longueurs de recouvrement l_r

- **Ronds lisses** : $l_r = 0.6 l_s$, valeurs pratiques: $l_r = 30 \phi$
- **Aciers HA (FeE400)**: $l_r = 0.4 l_s$, valeurs pratiques: $l_r = 16 \phi$
- **Aciers HA (FeE500)**: $l_r = 0.4 l_s$, valeurs pratiques: $l_r = 20 \phi$

Explication :

- Réduction de l_r : Le crochet crée un **point d'appui mécanique** dans le béton, diminuant la dépendance à l'adhérence linéaire (-40% vs barres droites).
- Différence aciers lisses/HA : Les barres HA ont une meilleure adhérence → réduction supplémentaire de 33%.

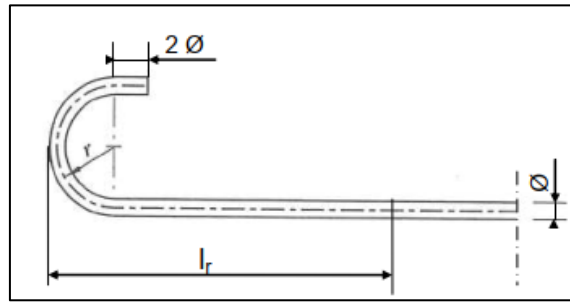


Figure. 3.12 : Façonnage du crochet normal

Exemple

- Barre HA500 $\varnothing 16$: $l_r = 20 \times 16 = 320$ mm
- Rond lisse $\varnothing 16$: $l_r = 30 \times 16 = 480$ mm

La figure 8.13 présente les dispositions constructives pour recouvrements avec crochets normaux.

La disposition des crochets en plan et en élévation est cruciale pour éviter les concentrations de contraintes et assurer un transfert efficace des efforts.

Règles de longueur de recouvrement l_r en fonction de l'espacement c (Tableau 3.5)

(c = distance entre axes des barres)

Tableau 3.5. Recouvrements avec crochets normaux.

Condition	Ronds lisses	Aciers HA (FeE400/500)	Explication physique
$c \leq 5\phi$	$l_r = 0.6$	$l_r = 0.4l_s$	Les barres proches agissent en "groupe cohésif" → transfert direct par adhérence mutuelle
$c > 5\phi$	$l_r = 0.6l_s + c$	$l_r = 0.4l_s + c$	L'espacement crée un effet de levier → nécessite une longueur supplémentaire cc pour équilibrer le moment

Valeurs pratiques :

- **Ronds lisses** : $l_r = 30\phi$ (si $c \leq 5\phi$)
- **HA FeE400** : $l_r = 16\phi$
- **HA FeE500** : $l_r = 20\phi$

Exemple :

Barre HA20 FeE500 ($l_s = 50\phi$) :

- $c = 80$ mm (4ϕ) → $l_r = 0.4 \times 50\phi = 20\phi = 400$ mm
- $c = 150$ mm (7.5ϕ) → $l_r = 400 + 150 = 550$ mm

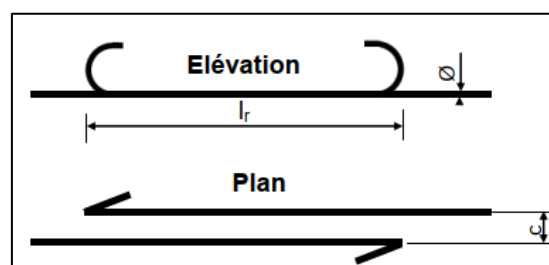


Fig. 3.13 : Jonction de barres tendues avec crochets normaux