

Chapitre 1 :

Conception et calcul des assemblages (poutre – poteau)

1.1- Introduction

Une structure en acier est constituée des profilés en I et/ou en H obtenus par laminage ou reconstitués par soudage. La réalisation de ce type de structure impose de lier ces éléments entre eux par des assemblages. Ces assemblages possèdent des formes multiples liées à la nature des efforts à transmettre mais aussi aux moyens d'attaches utilisés. A l'heure actuelle, il existe principalement deux types d'assemblages : les assemblages soudés et les assemblages boulonnés.

Ces assemblages assurent, en général, la continuité à l'intérieur d'un même élément ou servent de liaison nodale entre les éléments. Ils se caractérisent par de fortes complexités géométrique et mécanique. La complexité géométrique résulte du nombre d'éléments intermédiaires utilisés (boulons, platine, cornière...) et des formes géométriques variées de ces éléments qui engendrent de fortes discontinuités. La complexité mécanique provient des matériaux de natures différentes qui constituent les éléments, des jeux dans les trous pour boulons et du contact entre les différents composants de l'assemblage. En outre, le comportement local de ces assemblages affecte de manière directe le comportement global de la structure en acier [1].

La complexité du comportement des assemblages métalliques nécessite une analyse approfondie. Préalablement à cette analyse, nous présentons les types d'assemblages les plus utilisés et nous insisterons particulièrement sur leurs modèles de comportement en particulier dans le cas des assemblages boulonnés. Nous présentons les classes de rigidité, de résistance et de capacité de rotation de ces assemblages. Nous présentons aussi le mode de transfert des efforts entre les différentes parties de chaque type d'assemblage, les principales sources de déformations, les modes d'assemblages pratiques et les modes de renforcements existants. La méthode de modélisation des assemblages pour l'analyse globale de la structure est décrite.

1.2- Les assemblages boulonnés par platine d'extrémité

Les assemblages boulonnés par platine d'extrémité constituent les parties importantes dans les structures en acier. Les propriétés géométriques et mécaniques de ces assemblages ont une influence significative sur le comportement et la stabilité globale de la structure en acier.

1.2.1- Types d'assemblages boulonnés par platine d'extrémité

Les poutres et les poteaux dans une structure en acier peuvent être assemblés par différents types d'assemblages. Dans le cas des assemblages boulonnés par platine d'extrémité, on distingue, d'une manière commode, les types d'assemblages suivants :

- assemblages poutre-poteau ;
- assemblages poutre-poutre ;
- assemblages de raboutage (de continuité) ;
- assemblages de pied de poteau.

La figure(1.1) donne une illustration de ces types d'assemblages dans une structure en acier. Les poutres et les poteaux dans une structure en acier sont des sections en I ou H, obtenus par laminage ou reconstitués par soudage. Ces poutres et poteaux sont sollicités soit en flexion simple, soit en traction ou compression, soit en flexion composée. Ainsi, chaque type de ces assemblages doit être dimensionné pour transmettre les moments et/ou les efforts tranchants et/ou les efforts normaux.

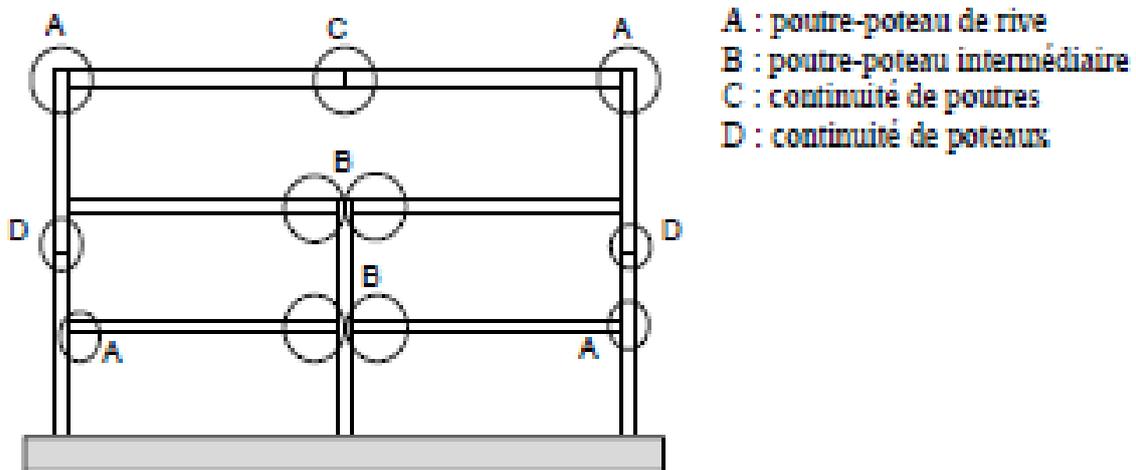


Figure 1.1 : Assemblages boulonnés par platine d'extrémité dans une structure en acier

a)-Assemblage poutre-poteau par platine d'extrémité

Ce type d'assemblages est souvent utilisé dans le cas de changement de direction et/ou des sollicitations, voir figure(2). Les sollicitations sont transmises de la poutre au poteau à l'aide de la platine soudée à l'extrémité de la poutre et attachée au poteau par des boulons. Les assemblages boulonnés par platine d'extrémité peuvent être réalisés par une platine courte, non débordante ou débordante.

La platine courte est soudée à l'âme de la poutre assemblée et boulonnée à l'aile du poteau ; la platine non débordante borde la poutre sur toute sa hauteur. Enfin, la platine débordante dépasse la hauteur de la poutre. La figure 1.2 donne une illustration de la topologie de ces trois types d'assemblages.

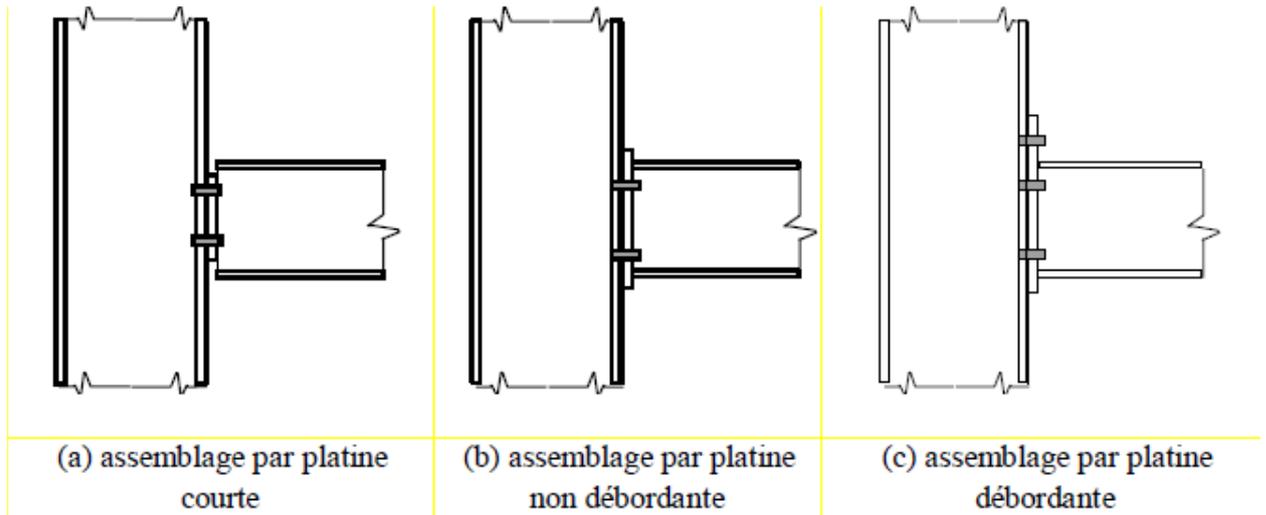


Figure 1.2 : Assemblage poteau poutre par platine d'extrémité boulonnée

Le terme assemblage signifie toute la zone d'interaction qui englobe une partie de la poutre assemblée, la platine d'extrémité y compris les boulons et soudures et la partie du poteau à hauteur de la platine, comme illustré dans la figure 1.3 pour le cas d'un assemblage poutre-poteau de rive et d'un assemblage poutre-poteau intermédiaire.

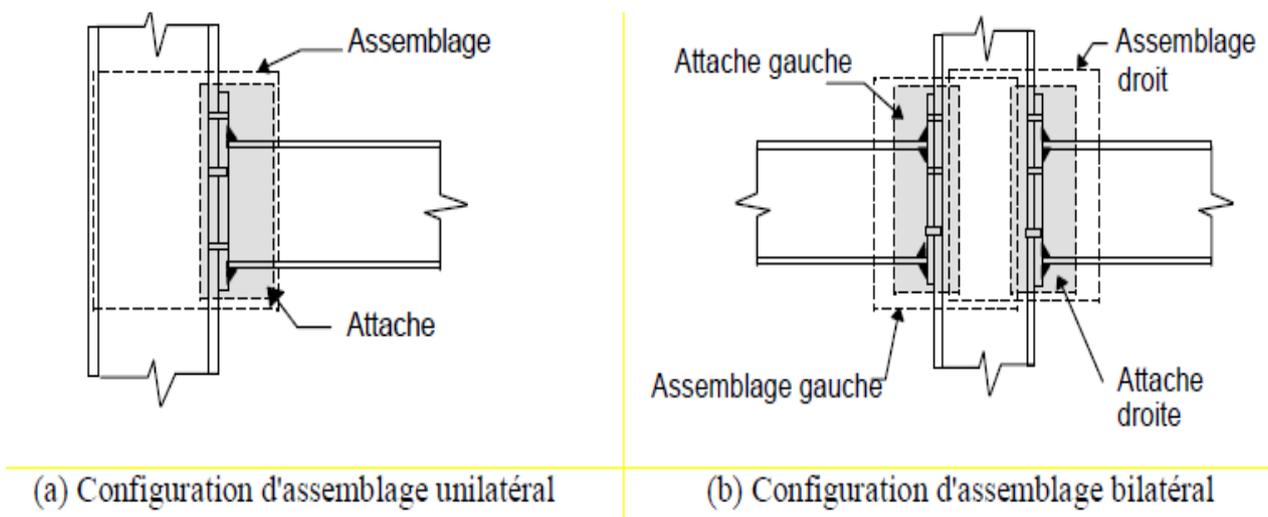


Figure 1.3 : Assemblages et attaches

Il convient de signaler que l'assemblage poteau-poutre peut être tridimensionnel. Il est alors caractérisé par la présence de poutres assemblées sur les semelles et sur l'âme du poteau

(Figure 1.4). C'est ainsi que nous pouvons trouver des zones d'attache sur l'axe de forte inertie sur l'axe de faible inertie du poteau.

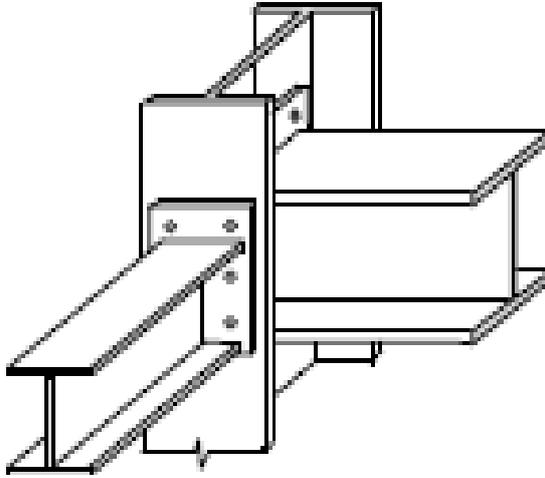
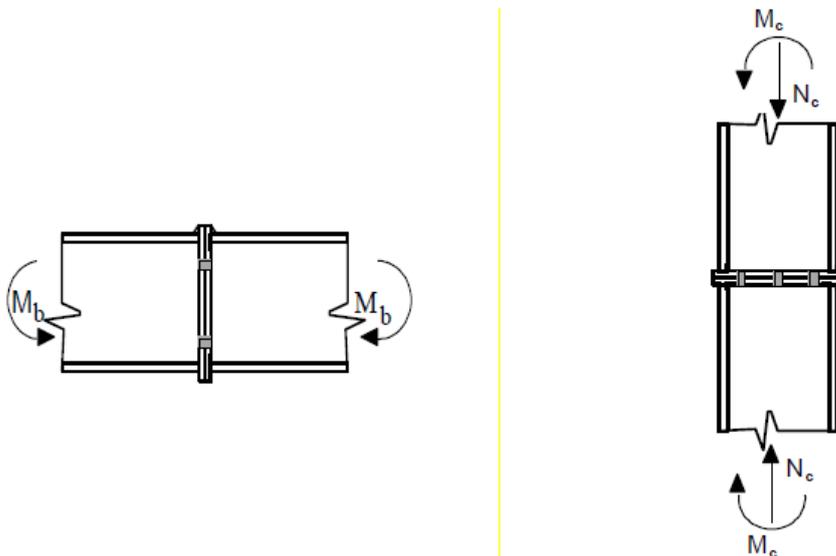


Figure 1.4.:Exemple d'assemblage tridimensionnel

b)-Assemblage poutre-poutre ou de raboutage

Ce type d'assemblages est souvent utilisé pour des raisons de transport ou de montage et lorsque la longueur des poutres ou des poteaux est limitée, voir figure 1.5. La platine peut être non débordante ou débordante.



(a) Assemblage de continuité de poutre

(b) Assemblage de continuité de poteau

Figure 1.5 : Assemblages de continuité de poutre et poteau

c)-Assemblage de pied de poteau

Ce type d'assemblages est utilisé lorsqu'il s'agit de relier une structure en acier à un noyau de béton, voir figure 1.6. La base du poteau est soudée à une platine mince ou épaisse, boulonnée au noyau du béton à l'aide des tiges d'ancrage.

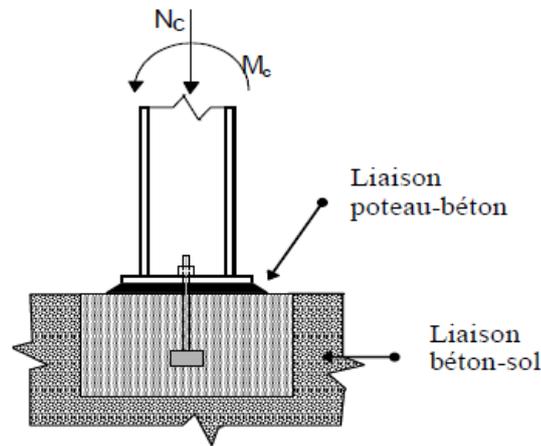


Figure 1.6: Assemblage pied de poteau

1.3 .Assemblage poteau-poutre par cornière d'âme et ou de semelle

Dans ce type d'assemblages (Figure 1.7), les cornières sont boulonnées sur les semelles et les âmes du poteau et de la poutre. L'assemblage de type (a) avec une simple cornière sur l'âme de la poutre est considéré comme articulé. Ce type d'assemblage ne peut transmettre que des efforts tranchants et éventuellement un effort axial de la poutre. Il doit être capable de subir une rotation significative sans développer des valeurs élevées de moment fléchissant. Les assemblages articulés sont utilisés dans une ossature de poutres et poteaux lorsque la rigidité latérale est assurée par d'autres moyens comme par exemple une palée de stabilité triangulée. Les assemblages de types (b) et (c) sont en général semi-rigides.

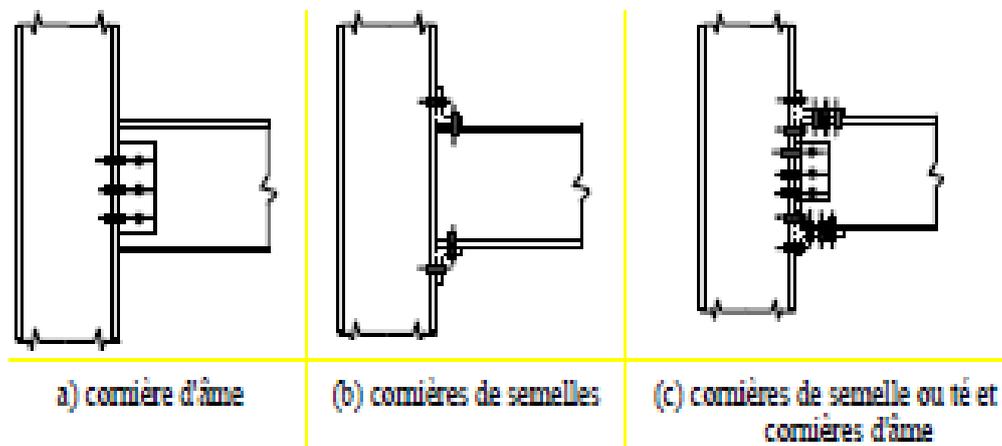


Figure 1.7 : Assemblage poutre-poteau par cornières d'âme et/ou des semelles

1.4- Comportement des assemblages

D'habitude dans l'analyse globale des structures poutres-poteaux en acier, l'assemblage boulonné par platine d'extrémité courte, dimensionné pour ne transmettre aucun moment de flexion, est idéalisé comme un noeud articulé — assemblage articulé (rigidité nulle) — qui n'empêche aucune rotation (rotation élevée) des sections assemblées ; l'assemblage boulonné par platine d'extrémité débordante, dimensionné pour transmettre l'ensemble des sollicitations, est idéalisé comme un noeud rigide — assemblage rigide (rigidité élevée) — qui interdit toute rotation relative (rotation nulle) entre les sections assemblées.

La figure(1.8) présente des exemples de comportement d'assemblages poutre-poteau par platine d'extrémité. La courbe 1 correspond à l'assemblage idéalisé comme un noeud articulé tandis que la courbe 2 correspond à l'assemblage idéalisé comme un noeud rigide. Les courbes 1, 2 et 3 correspondent aux assemblages boulonnés par platine d'extrémité courte, non débordante et débordante, respectivement. Chaque assemblage possède un comportement non-linéaire intermédiaire (semi-rigide) situés entre les deux extrêmes (courbes 1 et 2).

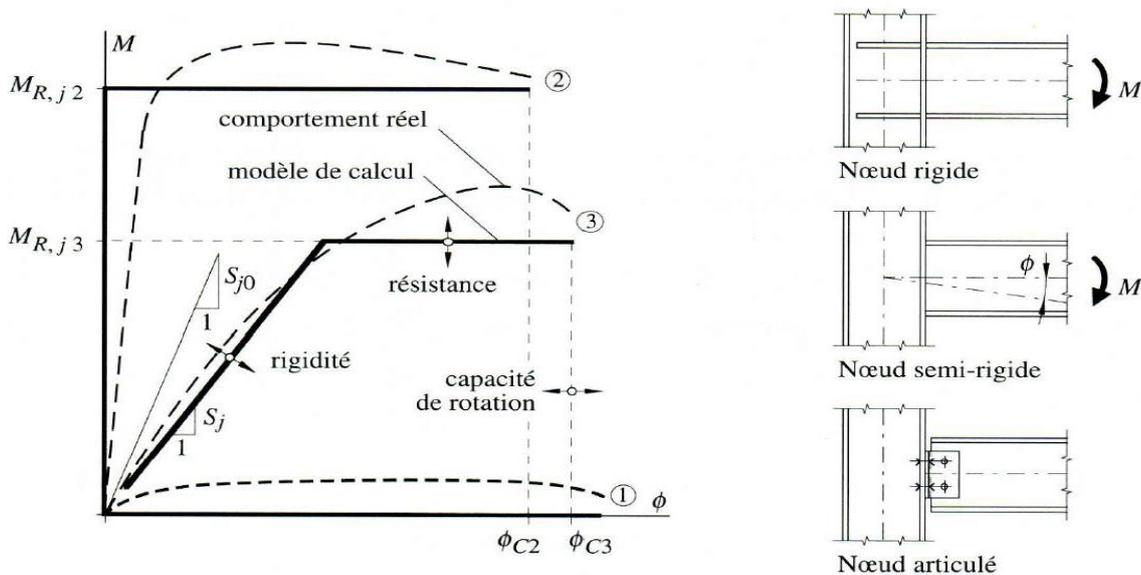


Figure 1.8: Comportement semi-rigide des assemblages en acier

Le comportement non-linéaire de ces types d'assemblages résulte de la forme géométrique et des proportions de l'assemblage, des moyens d'assemblages utilisés (boulons, soudures), des discontinuités et des propriétés mécaniques. Le comportement réel de chaque assemblage est représenté par une courbe moment-rotation figure 1.9, caractérisée par trois propriétés essentielles, à savoir :

- rigidité de rotation initiale ;
- capacité de résistance flexionnelle ;
- capacité de rotation

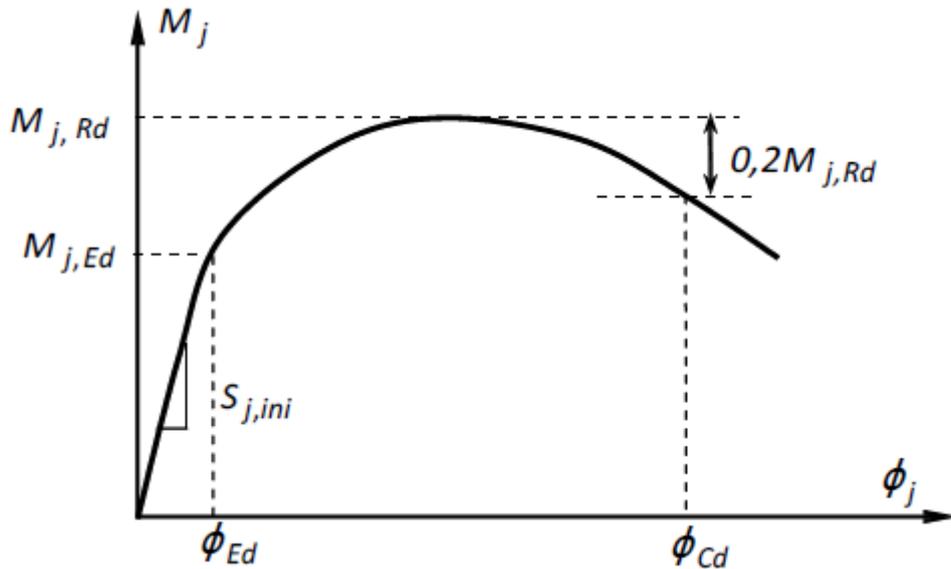


Figure 1.9 : Courbe moment-rotation d'un assemblage métallique

En se basant sur l'approche retenue par l'EUROCODE 3 [2] pour l'analyse globale des structures utilisant des assemblages par platine d'extrémité, il y a lieu de considérer les propriétés structurales (rigidité initiale, résistance et capacité de déformation) de chaque type d'assemblage. L'EUROCODE 3 suggère ainsi une classification des assemblages.

1.5-Classification des assemblages métalliques

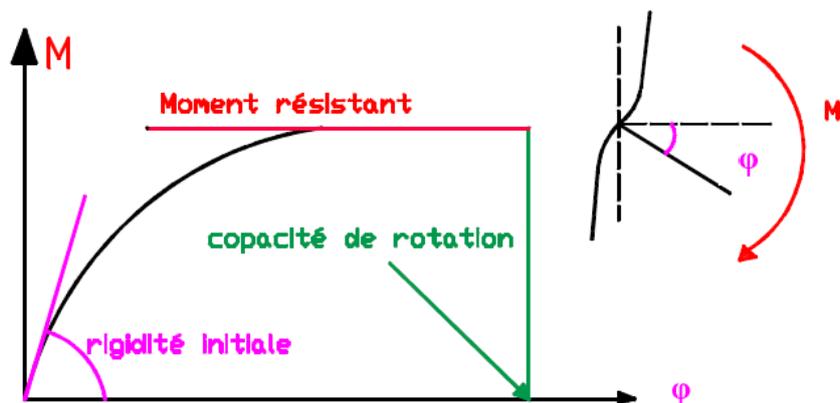


Figure 1-12. Représente le diagramme de comportement d'assemblage

Selon l'EC3, les assemblages doivent être modélisés en vue d'une analyse globale de la structure. Le type de modélisation des assemblages à adopter dépend de la classification en termes de rigidité (rigide, semi-rigide et articulé), de résistance (résistance complète ou partielle) et de capacité de rotation. Les critères de cette classification sont décrits ci-dessous.

1.5.1-Classification par la rigidité

La rigidité de l'assemblage intervient dans la phase initiale de l'analyse globale des structures en acier. Ainsi lors de la modélisation de la structure en acier, une attention particulière doit être accordée à la rigidité de l'assemblage. Bien sûr, la rigidité de l'assemblage influe sur le niveau de sollicitations et la flèche dans les poutres, comme illustré sur la figure 1.13. En particulier, la rigidité des assemblages peut également avoir des effets significatifs sur le comportement de la structure en acier et sur sa stabilité globale. La classification des assemblages, établie par l'approche de l'Eurocode 3, distingue l'assemblage articulé, l'assemblage semi-rigide et l'assemblage rigide et donne les limites de rigidités pour chaque type d'assemblage résumées ci-après

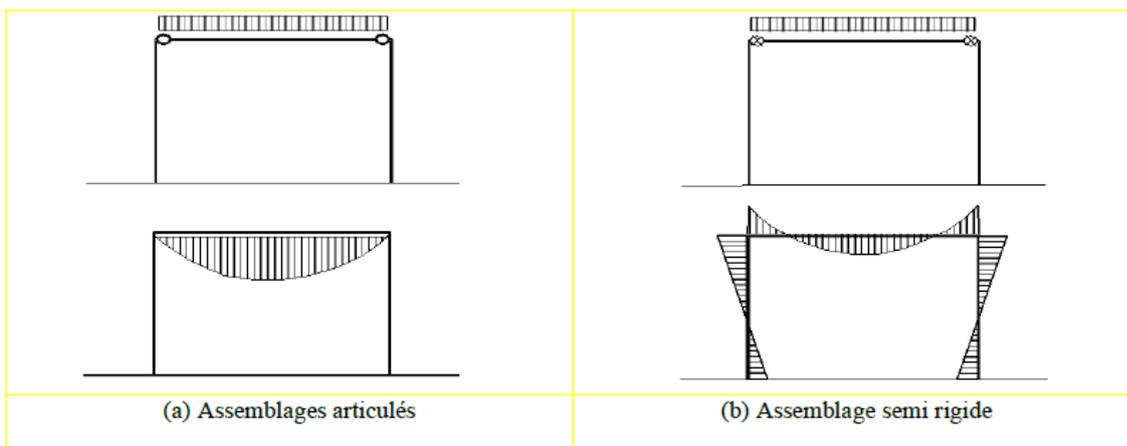


Figure 1.13: Répartition élastique des moments fléchissants dans un portique simple

a)-assemblage rigide

Lorsque l'assemblage rigide est considéré dans l'analyse globale de la structure en acier, sa conception et son dimensionnement doivent effectivement être tels pour que ses déformations aient une influence négligeable sur la distribution des efforts et sur les déformations de la structure en acier. Les assemblages rigides sont usuellement utilisés dans les structures en acier non contreventées. L'assemblage est considéré rigide si

$$M_{P1Rd} > EI_b/L_b \quad (\text{structure contreventée})$$

$$S_{j.ini} > 25E I_b/L_b \quad (\text{structure non contreventée})$$

Où $S_{j.ini}$, EI_b et L_b désignent, respectivement, la rigidité initiale de l'assemblage, la rigidité flexionnelle de la poutre assemblée et la longueur de la poutre.

Même si en règle générale un assemblage rigide est un assemblage qui permet de transmettre à la fois un moment de flexion, un effort tranchant et parfois un effort normal, il n'en reste pas moins que son rôle principal est de transmettre un moment de flexion.

b)-assemblage semi-rigide

$$0.5 E I_b / L_b < S_{j.ini} < 8 E I_b / L_b \quad (\text{structure contreventée})$$

$$S_{j.ini} < 25 E I_b / L_b \quad (\text{structure non contreventée})$$

c)-assemblage articulé

Ce type d'assemblage doit être suffisamment souple pour se déformer lors de la rotation. Il doit être conçu et dimensionné pour ne transmettre, en règle générale, aucun moment de flexion.

L'assemblage est considéré articulé si :

$$S_{j.ini} < 0.5 E I_b / L_b$$

Un assemblage articulé a donc pour mission de reporter depuis la poutre au poteau qu'un effort tranchant et/ou un effort normal. On comprend dès lors que ce type d'assemblage convient aux structures contreventées. Au niveau de chaque assemblage, les charges verticales sont transmises du plancher aux poutres et des poutres aux poteaux ; les charges horizontales sont reprises directement par le système de contreventement adopté.

1.5.2-Classification par la résistance

La classification fondée sur la résistance est utile dans le cas de structures en acier calculées par la théorie de plasticité. La classification de l'Eurocode 3 vis-à-vis de la résistance des assemblages fait une distinction entre l'assemblage à résistance complète, l'assemblage à résistance partielle et l'assemblage articulé (Figure 1.14).

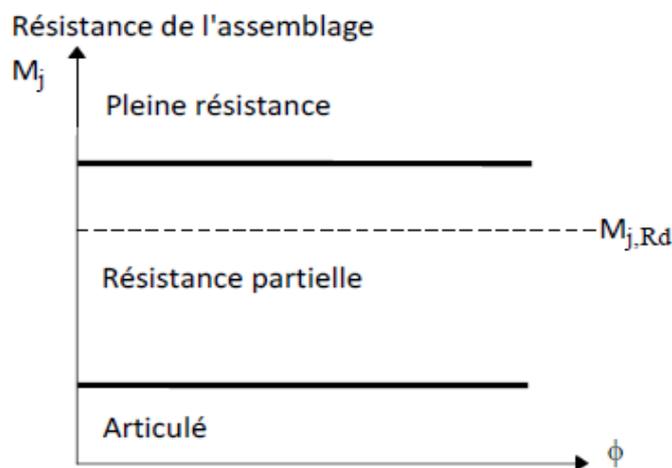


Figure 1.14: Limites de la classification des assemblages par résistance

a)-assemblage à résistance complète

Un assemblage à résistance complète est un assemblage qui possède une résistance plus grande que la résistance de la poutre assemblée. Dans ce cas, la déformation plastique est supposée se former dans la poutre assemblée. L'assemblage est considéré à résistance complète si :

$$M_{Rd} > M_{P1Rd} \quad (\text{avec vérification de la capacité de rotation})$$

$$M_{Rd} > 1.2 M_{P1Rd} \quad (\text{sans vérification de la capacité de rotation})$$

où M_{Rd} désigne le moment résistant de calcul de l'assemblage et M_{P1Rd} le moment plastique de calcul de la poutre assemblée.

Il n'est pas rare que la limite d'élasticité du matériau dont est constituée la poutre assemblée soit élevée par rapport à celle de l'assemblage. Dans ce cas, le calcul conduit alors à une sous-estimation de la résistance de la poutre assemblée et la rotule plastique se formerait dans l'assemblage.

b)-assemblage à résistance partielle

Un assemblage à résistance partielle représente la solution intermédiaire. L'assemblage doit posséder une capacité de rotation suffisante pour assurer la formation de la rotule plastique. L'assemblage est considéré à résistance partielle si :

$$0.25 M_{P1Rd} < M_{Rd} < M_{P1Rd}$$

c)-assemblage articulé

Un assemblage articulé possède une faible résistance, au maximum 25% de la résistance minimale requise pour avoir un assemblage résistance complète.

$$M_{Rd} < 0.25 M_{P1Rd}$$

1.5.3- Classification par la capacité de rotation

La capacité de rotation est une mesure de la déformation qui peut être atteinte avant que la ruine, dans l'assemblage ne provoque une chute de la résistance flexionnelle. Dans l'approche de l'EUROCODE 3, la classification des assemblages en termes de leur capacité de rotation demeure toujours vague. Cette classification constitue en principe une mesure de l'aptitude des assemblages à résister à une rupture fragile ou à instabilité locale prématurée. Une application pratique de cette classification des assemblages consiste à vérifier si une analyse globale basée sur un calcul plastique peut être conduite.

Une classification des assemblages selon leur capacité de rotation est toutefois proposée dans la littérature et qui dépend de la rotation de l'assemblage par rapport à celle de la poutre assemblée. Trois classes ont été définies à savoir, l'assemblage ductile, l'assemblage semi-ductile et l'assemblage fragile, voir figure 1.15. Le comportement ductile est caractérisé par une courbe moment-rotation avec un plateau étendu qui indique généralement l'apparition de déformations

plastiques avant la rupture. Le comportement fragile est caractérisé par une rupture, avec une rotation limitée, généralement sans déformation plastique. Enfin, le comportement semi-ductilité se situe entre le comportement fragile et le comportement ductile.

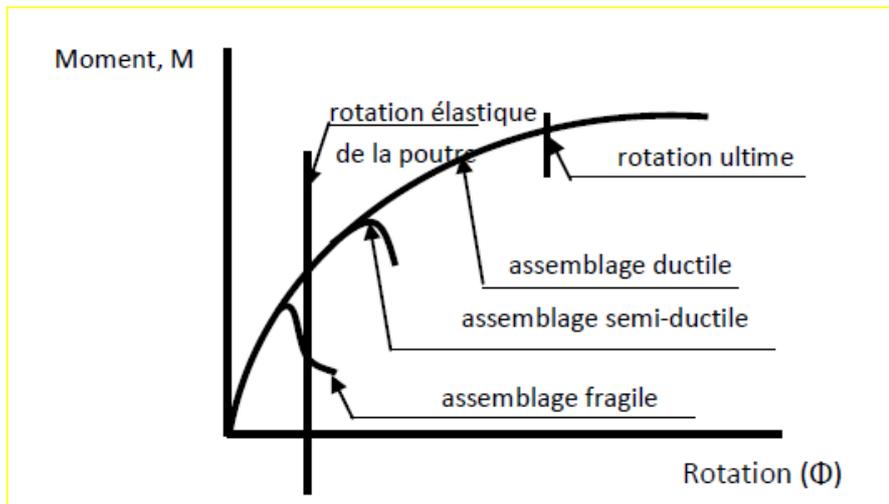


Figure 1.15 : Classification des assemblages par la capacité de rotation

1.6- Renforcement d'assemblages

L'assemblage par platine d'about est largement utilisé dans les structures métalliques et sa popularité est attribuée à la simplicité et l'économie de sa fabrication [Trahair 2007, Owens 1989, Kulak 1987]. Toutefois, ces assemblages sont extrêmement complexes dans leur analyse et comportement structural particulièrement quand ils sont soumis à des efforts très importants. Il convient donc d'être particulièrement vigilant sur les détails de conception des assemblages car c'est en cet endroit que se concentrent toutes les difficultés par suite de la présence de pièces intermédiaires. De surcroît, ces zones à brusque changement de géométrie induisent des efforts localisés et des concentrations de contraintes. Ainsi, des ajustements peuvent être faits à un assemblage par platine d'about simple pour répondre aux exigences de différentes situations [Moore 1983]. Par exemple, des raidisseurs de platine d'about peuvent être ajoutés pour augmenter la rigidité de la platine et/ou sa résistance tout en réduisant son épaisseur. Trois moyens de renforcement sont actuellement couverts dans l'EC3 : les raidisseurs transversaux de poteau, les contre-plaques et les doublures d'âme.

Les raidisseurs transversaux de poteau : ils sont soudés, au niveau des semelles en zones tendue et comprimée du poteau (Figure I-16a), pour augmenter la rigidité et la résistance de l'âme du poteau en traction et en compression et de la semelle du poteau en flexion. Des raidisseurs diagonaux peuvent être utilisés pour améliorer la résistance de l'âme du poteau en cisaillement (Figure I-16b), en combinaison avec les raidisseurs transversaux.

Les renforcements par contre-plaques : Ce sont des platines boulonnées contre lasemelle du poteau en recouvrant au moins deux rangées de boulons dans la zone tendue del'assemblage (Figure 1-16 c). Elles permettent d'augmenter la résistance de la semelle dupoteau pour certains modes de ruine ainsi que la rigidité dans certains cas, comme en présence de la précontrainte (Al-khatab, 2003), (Al-khatab et Bouchaïr, 2007). Dans l'EC3, seule la partie résistance est considérée

Les doublures d'âme : Une doublure d'âme, soudée sur tout son pourtour (Figure 1- 16d) est utilisée pour augmenter la résistance de l'âme du poteau vis-à-vis de la traction, de la compression et du cisaillement. Dans le cas où la largeur de la doublure est très grande, des boulons sont nécessaires pour la solidariser à l'âme du poteau.

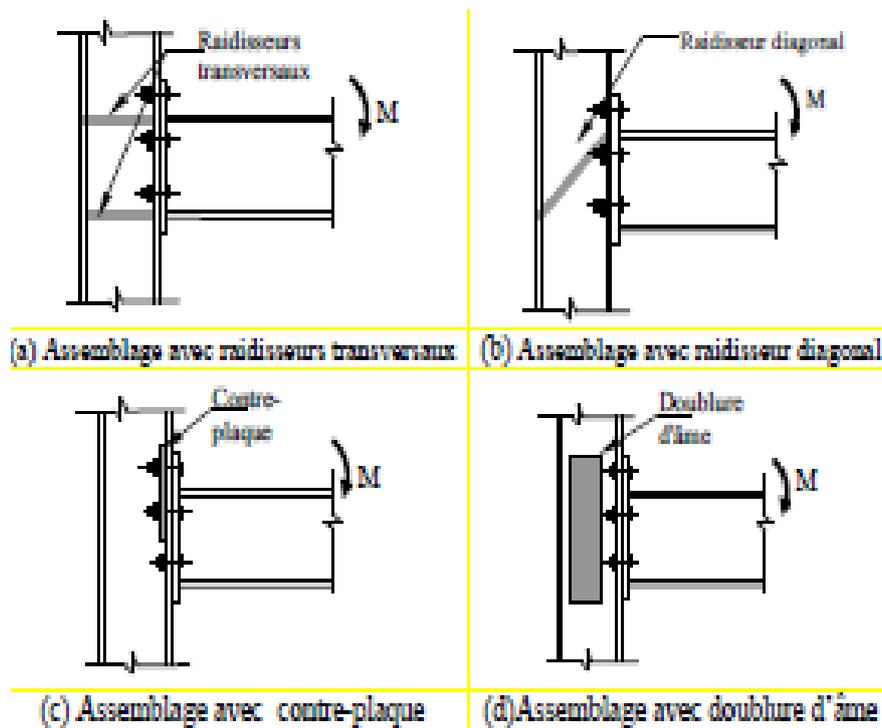


Figure 1-16 : Moyens de renforcement des assemblages selon l'EC3

Durant la dernière décennie, de nombreuses recherches expérimentales, analytiques et numériques ont été entreprises afin de mieux maîtriser le comportement d'assemblages de conceptions existantes ou nouvelles. L'assemblage avec raidisseurs de platine d'about débordante est relativement courant en France dans les continuités de poutre ou les liaisons poteau-poutre (Figure I-17). Ces raidisseurs sont sous forme d'un plat de gousset soudé entre la semelle de la poutre et la platine d'about pour raidir la partie prolongée de la platine d'about et assurer la continuité de l'âme de la poutre. Ce procédé est aussi répandu aux Etats-Unis et au Japon surtout après les séismes de Northridge (USA, 1994) et Hyokogen-Nanbu (Japon, 1995) tout en respectant en partie les traditions de conception et de fabrication des assemblages de ces mêmes pays (Ciutina, 2003).

Ces raidisseurs peuvent être utilisés dans les zones tendue et comprimée de l'assemblage, simultanément ou de façon séparée. La présence de ces raidisseurs peut modifier la distribution des efforts et par conséquent le mode de déformation et de ruine de l'assemblage (Mimoune 2003). Cependant, l'EC3 et le code algérien [CCM97 1998] ne donnent aucune indication quant à la façon dont les composants de l'assemblage se déforment et ne fournissent pas d'aide pour améliorer la conception de ce type d'assemblages. Dans le cadre de cette étude, un programme de recherche expérimental et numérique est réalisé pour améliorer la compréhension du comportement des assemblages avec raidisseurs de platine d'about.

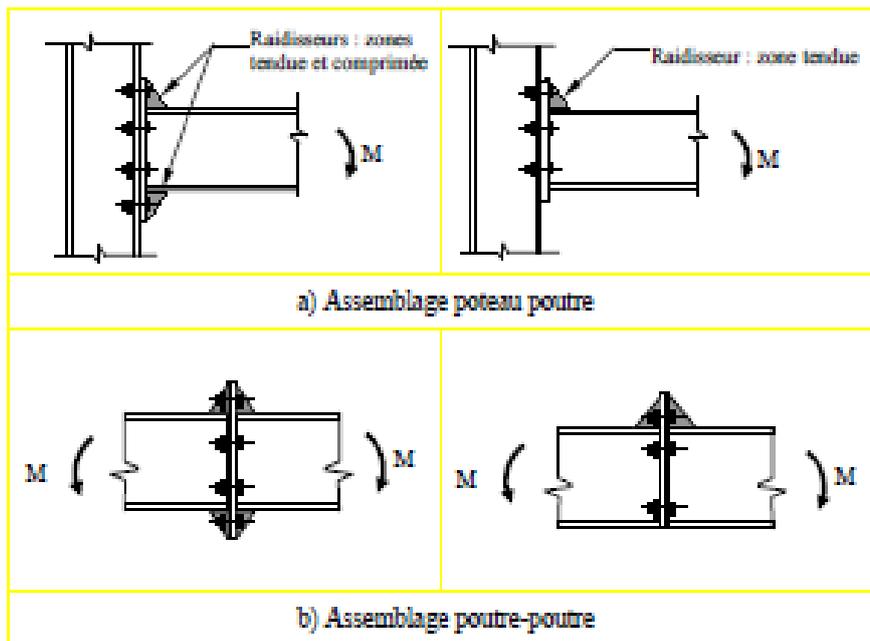


Figure I-17 : Assemblages avec raidisseurs de platine d'about débordante

1.7- Modélisation des assemblages poutre-poteau

En se basant sur l'approche de l'Eurocode 3, l'analyse globale d'une structure en acier nécessite la modélisation des poutres, des poteaux et des assemblages. Le choix de la méthode d'analyse des structures en acier gouverne les caractéristiques de l'assemblage à introduire.

Dans le cas d'une analyse globale élastique, on peut utiliser les trois types d'assemblages suivants :

- assemblage rigide ;
- assemblage semi-rigide ;
- assemblage articulé.

D'une manière similaire, dans le cas d'une analyse globale rigide-plastique, on peut utiliser les trois types d'assemblages suivants :

- assemblage à résistance complète ;
- assemblage à résistance partielle ;
- assemblage articulé.

Enfin, lors d'une analyse élastoplastique ou élastique parfaitement plastique, on peut utiliser les trois types d'assemblages suivants :

- assemblage rigide à résistance complète ;
- assemblage rigide à résistance partielle ;
- assemblage semi-rigide à résistance complète ;
- assemblage semi-rigide à résistance partielle ;
- assemblage articulé.

Par souci pratique, l'Eurocode 3 donne à cet égard les modèles d'assemblages continus, semi-continus ou articulés, voir tableau 1.1. Ces modèles sont :

- modèle continu (assemblage rigide et/ou à résistance complète)
- modèle semi-continu (assemblage rigide à résistance partielle ; assemblage semi-rigide à résistance complète et assemblage semi-rigide à résistance partielle) ;
- modèle simple (assemblage articulé).

MODELISATION	TYPE D'ANALYSE		
	Analyse élastique	Analyse Rigide-plastique	Analyse élastoplastique et élastique-parfaitement plastique
Continue	Rigide	pleine Résistance	Rigide/pleine Résistance
Semi-continue	Semi-rigide	Résistance partielle	Rigide/Résistance partielle Semi-rigide/pleine Résistance Semi-rigide/Résistance partielle
Simple	Articule	Articule	Articule

Tab. 1.1: Modélisation des assemblages dans l'analyse des structures en acier

Pour les assemblages semi-rigides, les charges provoquent à la fois un moment fléchissant (M) et une rotation relative (ϕ), comme illustré dans la figure (1.12) où, pour des raisons de simplicité, on suppose que l'analyse globale est effectuée avec des hypothèses élastiques linéaires

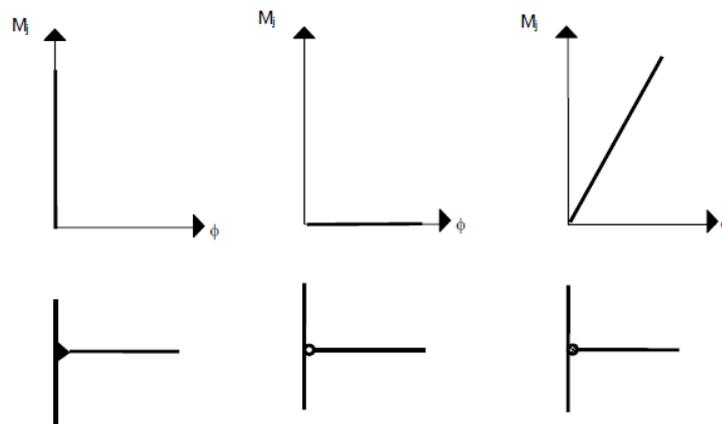


Figure 1.12 : Modélisation d'assemblages (analyse globale élastique)

L'avantage d'adopter des assemblages semi-rigides au lieu d'assemblages articulés permet de modifier non seulement les sollicitations introduites dans la structure en acier mais aussi les déplacements. Dans l'exemple donné dans la figure 1.13, les diagrammes de moments fléchissants répartis sont donnés pour les deux types d'assemblages (semi-rigides ou articulés). L'adoption des assemblages semi-rigides ont aussi des effets avantageux

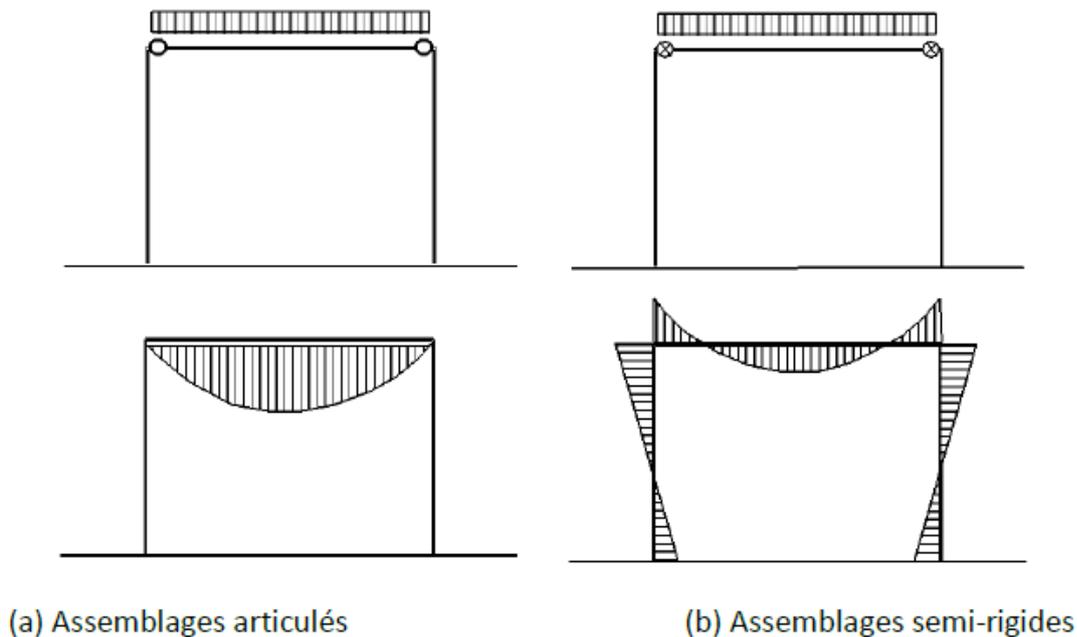


Figure 1.13 : Modélisation d'assemblages (analyse globale élastique)

1.9- Modélisation des assemblages adoptée par l'Eurocode 3

Pour déterminer les efforts appliqués à l'assemblage, une analyse globale s'impose. Dans cette analyse, on doit déterminer les charges de calcul appliquées sur la structure en acier ainsi que la définition des bases de dimensionnement de cette structure. Lors de cette analyse, il y a lieu également de prendre en compte le comportement structural de l'assemblage (assemblage articulé, semi-rigide ou rigide, assemblage à résistance partielle ou complète). La figure 1.14 donne une illustration de la modélisation simplifiée des assemblages (continu, semi-continu et simple) lors d'une analyse globale des structures en acier.

Dans cette modélisation, les poutres et les poteaux de la structure en acier sont représentés par des lignes (axes neutres) qui passent par les centres de gravité de leurs sections transversales. Ainsi, la portée effective des travées est dictée par la distance qui sépare les axes neutres des poteaux.

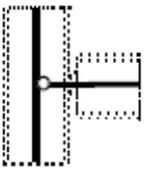
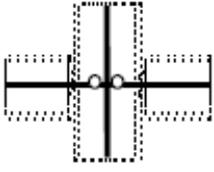
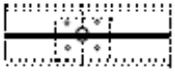
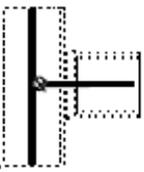
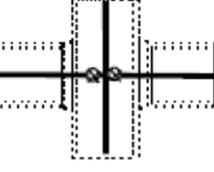
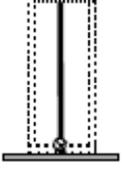
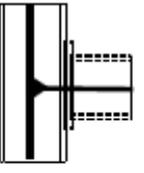
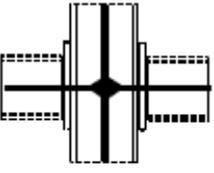
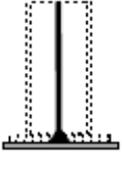
MODELISATION ASSEMBLAGES	ASSEMB. POUTRE-POTEAU FLEXION / AXE FORT	ASSEMB. DE CONTINUITÉ	BASES DE POTEAUX
SIMPLE			
SEMI-CONTINUE			
CONTINUE			

Figure 1.14: Modélisation simplifiée des assemblages selon l'Eurocode 3

Malgré les avantages dans la considération des assemblages semi-rigides et en dépit de l'approche de l'EC3 qui recommande de modéliser l'assemblage de la manière la plus réaliste possible, il y demeure une tendance de recourir dans la pratique à l'assemblage articulé ou l'assemblage rigide.

Il y a lieu de savoir que le concept de l'assemblage articulé et de l'assemblage rigide est retenu dans l'approche de l'EC3. Le choix d'un assemblage articulé ou rigide doit reposer sur une comparaison analytique de la rigidité de l'assemblage avec la rigidité de la poutre.