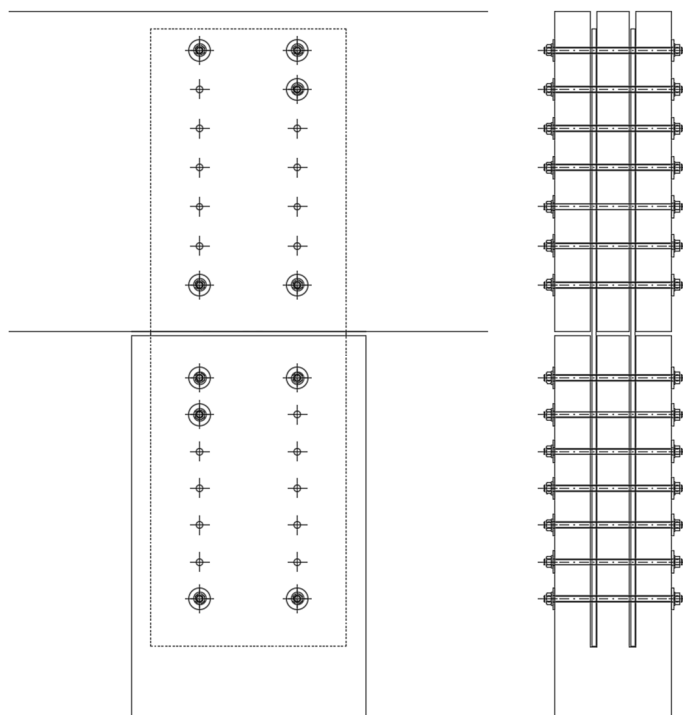


Assemblages de bois résistant au moment avec organes de type tige sollicités au cisaillement

Le concept de n_{ef} et la méthode de Porteous & Kermani : un regard critique

1. Domaine d'application et problématique

Cet article traite des assemblages de bois résistant au moment réalisés avec des organes de type tige sollicités au cisaillement : boulons, broches, vis et pointes. Le domaine d'application couvre aussi bien les assemblages bois-acier, par exemple avec une plaque d'acier insérée dans une fente, que les assemblages bois-bois-bois à plans de cisaillement multiples. Les assemblages avec tiges filetées collées, par exemple, sortent du domaine d'application : leur comportement mécanique repose sur un mécanisme fondamentalement différent de celui des organes de type tige et n'est pas traité ici.



À titre d'exemple concret, nous utilisons tout au long de cet article un assemblage entre un poteau en bois encastré et une poutre en bois en porte-à-faux, réalisé au moyen d'une plaque d'acier insérée au centre et d'assemblages boulonnés. Cet exemple sert uniquement d'illustration : les principes et les points sensibles abordés s'appliquent de manière comparable à d'autres types d'organes de type tige et à des configurations bois-bois-bois.

Un tel assemblage paraît simple, mais il ne l'est pas. Pour des assemblages comparables résistant au moment dans les structures en acier ou en béton, il existe généralement des méthodes de calcul normatives élaborées et univoques ; pour les assemblages de bois de ce type, un tel cadre fait défaut.

Cet article expose pourquoi il en est ainsi et distingue à cet effet deux notions souvent confondues dans la pratique : d'une part, la théorie pure du corps rigide, d'autre part, la méthode très répandue de Porteous & Kermani, qui s'appuie sur cette théorie sans pour autant s'y confondre.

2. Le cadre normatif de l'Eurocode 5

2.1. Ce que la norme régit

Ni la norme NBN EN 1995-1-1+A1:2015, ni le projet de la nouvelle norme FprEN 1995-1-1:2025 ne fournissent de méthode de calcul pour un assemblage résistant au moment avec des organes de type tige. Le §8.1.1 dispose qu'un assemblage doit être évalué en tenant compte des forces et des moments qui s'y exercent. Cette disposition n'a toutefois que le caractère d'un principe général de vérification et ne donne aucune indication sur la répartition interne des efforts au sein d'un tel assemblage.

Le §11.3.1(6) de FprEN 1995-1-1:2025 prescrit que, pour un assemblage résistant au moment, le calcul doit être effectué pour tous les organes afin d'identifier l'organe le plus sollicité, sans indiquer comment la répartition des efforts entre les différents organes doit être déterminée. Le §11.4.3(2) et le tableau 11.21 contiennent bien des règles de disposition géométrique, mais celles-ci sont expressément limitées au LVL/GLVL avec des organes disposés selon un motif circulaire.

2.2. Ce que la norme ne régit pas : le rôle des essais

Les Eurocodes n'excluent pas le recours à des assemblages non entièrement normalisés, mais le lient à une procédure établie. L'EN 1990, §7.3(1)-(2), autorise l'utilisation d'essais physiques pour déterminer des paramètres de calcul ou le comportement d'un élément de structure, précisément dans les situations où aucun modèle de calcul approprié n'est disponible. Le §7.3(3)-(4) pose à cet égard comme condition que le niveau de fiabilité requis soit garanti, en tenant compte tant de l'incertitude statistique liée à un nombre limité d'essais que de l'incertitude inhérente au modèle de calcul utilisé. L'Annexe D de la norme développe davantage ce cadre statistique.

Cette voie n'est cependant pas sans contraintes. Un dimensionnement étayé par des essais exige un nombre suffisant d'essais pour démontrer statistiquement le niveau de fiabilité requis, ce qui implique des coûts et des délais considérables. Cela rend les essais surtout réalisables lorsqu'un même détail d'assemblage est appliqué de manière répétitive, de sorte que le coût de la campagne d'essais puisse être réparti sur un grand nombre d'exemplaires. Pour un assemblage unique, non répétitif, une telle justification par essais est souvent difficile à réaliser en pratique, précisément dans la situation où aucune méthode de calcul normative n'est disponible sur laquelle s'appuyer.

3. Le concept de n_{ef} : deux mécanismes dans une seule formule empirique

3.1. La théorie du corps rigide de Lantos

Le §8.1.1(4) de la norme NBN EN 1995-1-1:2015 prescrit que la résistance caractéristique efficace d'organes disposés en une seule file parallèlement au fil du bois est déterminée au moyen d'un nombre efficace d'organes, n_{ef} . Ce concept repose sur les recherches de Lantos (1969). Lantos ne part pas de la théorie du corps rigide dans sa forme la plus pure, dans laquelle les éléments à assembler sont supposés indéformables, mais tient au contraire compte du fait que les éléments en bois comme les organes se comportent de manière élastique. Il en résulte que les organes extrêmes d'une file transmettent plus d'effort que les organes plus centraux, en fonction de la rigidité des éléments, de la rigidité des organes, de leur espacement mutuel et de leur nombre. Il en découle un nombre équivalent d'organes, n_{ef} .

Cette expression ne s'applique toutefois pas sans réserve lorsque l'élément central est nettement plus rigide que le bois environnant, comme dans le cas d'une plaque d'acier insérée dans une fente. Dans ce cas, le rapport entre les rigidités des éléments intermédiaires change sensiblement.

3.2. Rupture fragile par traction perpendiculaire au fil

Autour d'un organe, il n'apparaît pas seulement des contraintes de pression diamétrale, mais aussi des contraintes de traction et de cisaillement, tant parallèlement que perpendiculairement à la direction de l'effort. Jorissen (1998) l'a déjà démontré dans sa thèse de doctorat sur les assemblages de bois avec organes de type tige : pour des organes alignés, la contrainte de traction augmente par accumulation, alors que cet effet diminue à mesure que la distance entre les organes croît. L'effet de contrainte et l'effet géométrique, à savoir la répartition inégale des efforts issue des considérations de corps rigide, agissent donc en sens opposés.

Jorissen a synthétisé les résultats de 950 essais sur des assemblages bois-bois dans un modèle de régression empirique, dans lequel l'influence de l'espacement entre les organes est explicitement intégrée. Il ressort de cette régression que, pour le type d'assemblage étudié, la résistance augmente à mesure que les organes sont plus éloignés les uns des autres : l'effet de contrainte l'emporte donc sur l'effet géométrique. Le modèle ne distingue toutefois pas les deux causes sous-jacentes de la réduction de résistance, à savoir la répartition non uniforme des efforts d'une part et le fendage fragile d'autre part. Une simplification supplémentaire de ce modèle trouve son application dans l'approche actuelle de n_{ef} dans l'Eurocode 5.

3.3. Pourquoi la distinction est importante

Yurrita & Cabrero (2021) soulignent que l'approche actuelle de l'Eurocode 5, dans laquelle n_{ef} est utilisé comme paramètre de réduction global unique, regroupe différents mécanismes de ruine et ne distingue pas suffisamment les modes de ruine ductiles des modes fragiles. Cette distinction est pourtant nécessaire pour évaluer correctement le comportement réel des assemblages par organes de type tige. Aquino et al. (2026) le confirment par une approche numérique : la formule actuelle de n_{ef} recouvre deux effets physiques distincts, la répartition non uniforme de la charge résultant de la déformation élastique et l'accumulation de contraintes de traction perpendiculaires au fil entre organes successifs, sans les modéliser séparément. Le domaine d'application de telles formules empiriques doit donc, comme le soulignent ces auteurs, rester limité à des bornes clairement définies ; leur extrapolation, par exemple aux assemblages acier-bois, peut conduire à des écarts systématiques et non conservatifs.

4. Des files sollicitées axialement aux assemblages résistant au moment

La base expérimentale de Jorissen, tout comme l'analyse antérieure de Lantos, concerne des files linéaires d'organes sollicitées selon une même direction axiale, avec des organes de rigidité égale. Dans un assemblage résistant au moment, il en va tout autrement : le vecteur effort de chaque organe diffère en intensité et en direction, et la rigidité d'un organe est fonction de l'angle entre ce vecteur effort et la direction du fil, angle qui diffère pour chaque organe au sein d'un même assemblage.

La détermination de la résistance au fendage perpendiculairement au fil du bois, expression (8.4) de la norme NBN EN 1995-1-1:2015 et développée plus avant au §11.6 de FprEN 1995-1-1:2025, est elle aussi établie pour une configuration dans laquelle la composante de l'effort perpendiculaire au fil est de même sens et répartie uniformément pour tous les organes, de sorte que l'effort de traction dans l'élément principal est maximal au niveau de l'organe le plus éloigné de la rive chargée. Cette hypothèse n'est pas satisfaite dans un assemblage résistant au moment : les vecteurs effort diffèrent d'un organe à l'autre en intensité et en direction, si bien que la charge de traction totale doit être vérifiée séparément au droit de chaque organe. L'application du facteur de réduction n_{ef} déterminé empiriquement, et de la formule standard de résistance au fendage, à un assemblage résistant au moment suppose donc toujours une extrapolation à une configuration de charge fondamentalement différente de celle pour laquelle les deux ont été développés et validés.

5. La méthode de Porteous & Kermani

5.1. Points de départ : théorie du corps rigide avec corrections

La méthode de Porteous & Kermani (Structural Timber Design to Eurocode 5, chapitre 12), très utilisée en pratique d'ingénierie, est une tentative d'appliquer les dispositions existantes de l'EN 1995-1-1 aux assemblages de bois résistant au moment avec organes de type tige, pour lesquels

la norme elle-même ne prévoit aucune méthodologie de calcul spécifique. La méthode est construite autour de la théorie du corps rigide : les efforts dans les organes sont, pour l'essentiel, calculés comme si l'assemblage se comportait comme un corps rigide, complétés par des corrections s'appuyant sur les principes de l'Eurocode 5 pour les assemblages par organes de type tige.

Cela distingue la méthode du calcul pur de corps rigide : alors que ce dernier ne tient compte d'aucune réduction de résistance, la méthode de Porteous & Kermani tente d'intégrer une correction par le biais des dispositions existantes de l'EC5. Pour autant que l'on puisse le vérifier, cette application spécifique n'est toutefois pas étayée par des résultats propres de simulations par éléments finis ou d'essais expérimentaux sur des assemblages résistant au moment. La méthode est présentée comme une dérivation théorique de principes normatifs existants, et non comme une méthode de dimensionnement étayée par des essais ou une validation numérique.

5.2. Ce que la méthode ne vérifie pas

Lors de la vérification de la résistance des éléments assemblés, la méthode part du principe que la formule de fendage de l'Eurocode 5, expression (8.4), n'est pas directement applicable à cette configuration de charge. Cela est également exact, comme expliqué ci-dessus, compte tenu de la configuration différente. Sur cette base, la vérification dans la méthode se limite toutefois à un contrôle de la résistance au cisaillement des éléments concernés, sans vérification adaptée de la contrainte de traction perpendiculaire au fil.

Cela pose problème, car l'EN 1995-1-1 contient au §8.1.4(1)P un principe impératif, avec une disposition analogue au §11.6 de FprEN 1995-1-1:2025, qui prescrit que, chaque fois qu'un effort agit selon un angle par rapport à la direction du fil, la possibilité d'un fendage provoqué par la composante de traction perpendiculaire au fil doit être prise en compte. Cette vérification n'est donc pas facultative. En d'autres termes, le fait que la formule standard ne soit pas applicable telle quelle à cette configuration ne dispense pas le concepteur de l'obligation d'effectuer malgré tout la vérification au fendage au moyen d'une évaluation adaptée.

5.3. Place dans le processus de conception

Cela ne signifie pas que la méthode de Porteous & Kermani soit inutile, bien au contraire. Malgré les limites exposées ci-dessus, elle reste l'une des méthodes les plus accessibles et les plus utilisées en pratique d'ingénierie pour dimensionner des assemblages de bois résistant au moment avec organes de type tige. Elle n'est toutefois recommandée ni déclarée applicable dans aucune norme, ni dans la NBN EN 1995-1-1:2015, ni dans FprEN 1995-1-1:2025, et ne dispense donc pas le concepteur de l'obligation d'évaluer de manière critique ses hypothèses sous-jacentes et son domaine d'application.

La méthode doit dès lors être considérée comme une première étape au sein d'un processus de conception plus large, utile comme point de départ analytique, mais non comme une méthode de dimensionnement autonome et suffisamment validée. Une vérification complémentaire est toujours indiquée. Pour une application unique, cette vérification par essais est souvent difficile à réaliser, ce qui exige un regard d'autant plus critique sur les hypothèses retenues.

6. État des connaissances scientifiques

Le mécanisme de rupture fragile par fissuration parallèle à la direction du fil est désormais documenté par une série de publications indépendantes, y compris spécifiquement pour les assemblages résistant au moment avec plaque d'acier insérée dans une fente. Yurrita, Cabrero & Quenneville (2019) ont étudié précisément ce type d'assemblage et ont constaté que sa capacité peut être déterminée par une rupture fragile plutôt que par un mécanisme de ruine ductile. Rebouças, Mehdipour, Branco & Lourenço (2022) décrivent un essai en laboratoire sur un assemblage résistant au moment en bois lamellé-collé, avec boulons en acier et plaque d'acier insérée dans une fente, au cours duquel l'essai a été interrompu en raison d'une fissuration attribuée à une forte contrainte de traction perpendiculaire au fil. La même publication constate en outre que le centre de rotation fixe supposé par l'approche du corps rigide ne se vérifie pas expérimentalement : le centre de rotation de l'assemblage s'est déplacé au cours du chargement.

Les simulations non linéaires par éléments finis de ce type d'assemblage montrent elles aussi généralement que les contraintes de traction perpendiculaires au fil, autour des organes les plus sollicités, peuvent dépasser la valeur limite admissible avec une marge considérable, constat qui rejoint la littérature expérimentale citée ci-dessus. Une étude de suivi récente d'Aquino et al. (2025) généralise pour la première fois le modèle numérique de ce groupe de recherche à des situations combinant efforts et moment fléchissant, et constate que l'effort normal et le moment fléchissant interagissent de manière distincte dans la ruine de l'assemblage. Le fait qu'une généralisation aussi fondamentale n'ait été publiée que récemment confirme qu'une description mécanique fiable des assemblages par organes de type tige soumis à un moment n'est pas encore entièrement disponible : il s'agit toujours d'un domaine de recherche actif, dans lequel la validation expérimentale joue encore un rôle central.

7. Conclusion

Ce qui précède conduit à un certain nombre de conclusions pertinentes pour tout concepteur confronté à ce type d'assemblage :

- Aucune version de la norme Eurocode applicable, actuelle ou en projet, ne contient de méthode de calcul pour un assemblage de bois résistant au moment avec organes de type tige.

- La théorie du corps rigide constitue le point de départ théorique pour ce type d'assemblage, mais ne suffit pas à elle seule : elle ne tient compte ni de la répartition non uniforme de la rigidité, ni des mécanismes de rupture fragile.
- La méthode de Porteous & Kermani prolonge cette théorie du corps rigide par des corrections tirées de l'Eurocode 5, mais extrapole ce faisant un facteur de réduction empirique au-delà de son domaine d'application validé et omet d'effectuer systématiquement une vérification normative impérative de la contrainte de traction perpendiculaire au fil.
- Le mécanisme de rupture fragile par contrainte de traction perpendiculaire au fil est documenté expérimentalement pour ce type d'assemblage.
- Conformément au principe de l'EN 1990, §7.3, l'application d'une méthode de calcul non normalisée exige une justification par essais, en tenant compte tant de l'incertitude statistique que de l'incertitude de modèle.
- Cette justification par essais n'est pas facultative et exige un nombre suffisant d'essais ; elle n'est donc réalisable que dans le cas d'une application répétitive d'un même détail d'assemblage. Pour un assemblage unique, non répétitif, une telle justification est souvent difficile à réaliser en pratique, précisément dans la situation où aucune méthode de calcul normative n'est disponible sur laquelle s'appuyer.

8. Références

- NBN EN 1990:2023, Eurocode : Bases de calcul des structures (§7.3, Annexe D).
- NBN EN 1995-1-1+A1:2015, Eurocode 5 : Conception et calcul des structures en bois, Partie 1-1.
- FprEN 1995-1-1:2025 (E), projet final, Eurocode 5: Design of timber structures, Part 1-1.
- Aquino et al. (2026). "Numerical simulation of the effective number of fasteners in dowelled timber connections." *Materials and Structures*, 59:282.
- Aquino et al. (2025). "Numerical and fracture mechanics-based simulations of brittle failure in dowelled timber connections under in-plane multiaxial forces and bending moment." *Engineering Structures*, 343(B), 119398.
- Porteous, J. & Kermani, A., *Structural Timber Design to Eurocode 5*, chapitre 12.
- Rebouças et al. (2022). "Ductile Moment-Resisting Timber Connections: A Review." *Buildings*, 12(2), 240.
- Yurrita, Cabrero & Quenneville (2019). "Brittle failure in the parallel-to-grain direction of multiple shear softwood timber connections with slotted-in steel plates and dowel-type fasteners." *Construction and Building Materials*, 216, 296–313.
- Yurrita & Cabrero (2021). "On the need of distinguishing ductile and brittle failure modes in timber connections with dowel-type fasteners." *Engineering Structures*, 242, 112496.
- Jorissen, A. (1998). *Double shear timber connections with dowel-type fasteners*. Thèse de doctorat, TU Delft.
- Lantos, G. (1969). "Load distribution in a row of fasteners subjected to lateral load." *Wood Science*, 1(3), 129–136.
- Blass, H.J., *Timber Engineering, Step 1, Lecture C15*.

- Blass, H.J. & Sandhaas, C. (2017), Timber Engineering, Principles for design, Lecture E11.

Van den Bossche Tom

09/2026

Traduction automatique du néerlandais, relue et corrigée par l'auteur.