

EVALUATION DE LA SEMI-RIGIDITE DE DIAPHRAGMES EN BOIS - MODELISATION NUMERIQUE -

Fuentes S., Vu T.K., Fournely E., Bouchaïr A.

*Clermont Université, Université Blaise Pascal, LaMI, BP 206, F-63000 Clermont-Ferrand, France
sebastian.fuentes@polytech.univ-bpclermont.fr*

Résumé

Actuellement, la construction en ossature bois se présente comme une alternative attirante du point de vue technique, économique et écologique. Habituellement, ce type de structures utilise un ensemble de contreventements verticaux et de diaphragmes horizontaux. Face aux sollicitations latérales générés par le séisme, les diaphragmes reprennent les forces horizontales pour les transmettre vers le système de contreventement et celui-ci aux fondations. Ceci met en évidence l'importance de la transmission des efforts au sein d'un diaphragme. Cette problématique concerne aussi bien les bâtiments neufs que les opérations de renforcement du bâti ancien.

Les diaphragmes peuvent présenter des comportements flexibles ou rigides ; le transfert des efforts de flexion et de torsion est largement influencé par l'éventuelle semi-rigidité des diaphragmes. La rigidité du diaphragme est directement liée à sa déformation dans le plan sous une charge horizontale. Pour pouvoir classer le diaphragme en rigide ou flexible, il est nécessaire d'utiliser une approche permettant d'évaluer cette déformation sous une sollicitation donnée. Cette approche doit être capable de prendre en compte tous les facteurs qui contribuent à la déformation du diaphragme, comme les sollicitations de flexion et cisaillement dans le plan, la semi-rigidité de connexion, la discontinuité des composants et les trémies. Ces facteurs font que le calcul de déformations n'est pas facile à mettre en œuvre. Actuellement, des méthodes analytiques simplifiées prennent en compte quelques uns des facteurs précités, mais elles sont applicables à un nombre réduit de configurations de planchers avec des paramètres pas toujours connus ; leur mise en application est peu courante en France.

Une simulation numérique par éléments finis permet de considérer les différents comportements élémentaires des composants d'un plancher-diaphragme avec un grand nombre de configurations géométriques et constitutives. Dans ce travail, le concept de modélisation des diaphragmes est présenté avec des éléments de validation et quelques exemples d'application. Les modèles présentés permettent de prendre en compte des phénomènes complexes comme le comportement non-linéaire des liaisons et le transfert d'effort par contact entre composants. Une analyse de la sensibilité de la rigidité du diaphragme au comportement mécanique de ses composants est conduite et une comparaison critique des résultats obtenus par différentes méthodes d'analyse permet de déterminer les limites et les capacités du modèle proposé. Cette analyse de diaphragme isolé permet de déterminer ses caractéristiques mécaniques (rigidité, résistance, ductilité) qui seront utilisées dans une analyse de comportement sismique de structures bois.

1. Introduction

Actuellement, les aspects liés à l'environnement de même que les aspects techniques et économiques, font de la construction bois une alternative constructive attirante. Le bois est un matériau naturel, énergétiquement efficient et renouvelable. Cependant, les études relatives aux systèmes constructifs en bois restent limitées. Ces études concernent principalement les poutres, les poteaux, les assemblages, les murs et les planchers en tant qu'éléments pris isolément.

Traditionnellement, les planchers sont utilisés pour reprendre des charges verticales. Cependant, leurs contributions en tant que systèmes de reprise des efforts horizontaux dus au vent ou aux sollicitations sismiques sont prouvées [1] [3]. Ainsi, Les planchers qui fonctionnent en diaphragmes constituent un élément important dans une construction en bois, ils doivent être conçus pour résister non seulement aux charges verticales mais aussi aux actions horizontales provenant du séisme ou du vent. Dans les bâtiments à ossature bois, les structures de plancher sont principalement composées par des solives en bois qui reprennent essentiellement les sollicitations verticales, des entretoises qui lient les solives, des panneaux de revêtement à base de bois qui sont souvent fixés aux solives par des clous, des vis ou des agrafes. Cette configuration de planchers est complétée par des poutres périphériques assurant le rôle de chaînage (figure 1).

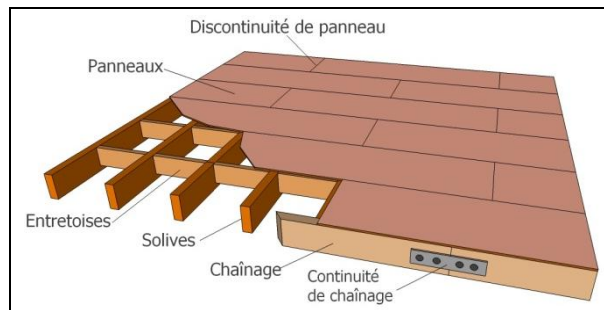


Figure 1. Composition basique d'un plancher-diaphragme en bois.

Le but de cette étude est de proposer des bases pour la modélisation numérique de ces planchers en bois en prenant en compte le comportement non linéaire de leurs composants et en considérant plusieurs configurations géométriques afin de couvrir un large panel de situations. Un des objectifs est de comprendre le fonctionnement mécanique de ces systèmes multi-composants en vue de l'intégrer dans une approche d'analyse des structures sous sollicitations sismiques. Aussi, il est intéressant d'évaluer l'évolution des caractéristiques mécaniques de ces systèmes en termes de rigidité, résistance et ductilité.

2. Effet diaphragme dans les structures en sollicitation sismique.

Une sollicitation sismique peut se traduire par une charge horizontale appliquée au droit des localisations de masses (planchers et toiture). Dans le cas des constructions en ossature en bois constituées par des planchers en diaphragmes et des murs de contreventement, le fonctionnement général de la structure suit le schéma montré dans la figure 2 [1]. Dans cet exemple, la charge horizontale est reprise en premier temps par le plancher qui fonctionne en diaphragme. Celui-ci transmet les efforts principalement vers les murs parallèles à la sollicitation, et ces derniers les transfèrent aux fondations par cisaillement dans le plan et par moment de renversement autour d'un axe perpendiculaire à ce plan. Les murs et le plancher sont supposés articulés respectivement sur les fondations ou structure inférieure et sur les murs de contreventement. De cette manière on considère que le plancher travaille comme une poutre disposée horizontalement pour laquelle les murs agissant comme des appuis.

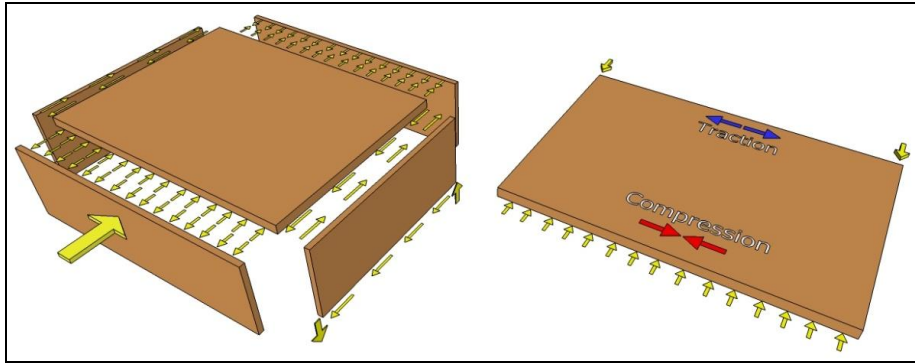


Figure 2. Schéma de distribution de forces sur un plancher en diaphragme [1].

Le comportement mécanique du plancher est plutôt assimilé à celui d'une poutre en I de grande hauteur où l'effet des efforts tranchants n'est pas négligeable. Cette poutre en I est composée par les poutres du chaînage périphérique qui représentent les semelles et qui travaillent sous efforts de compression ou traction, les panneaux de revêtement sont considérés comme une seule plaque continue qui constitue l'âme de la poutre en reprenant essentiellement les efforts de cisaillement [1] [2]. Cette analogie est illustrée dans la figure 3.

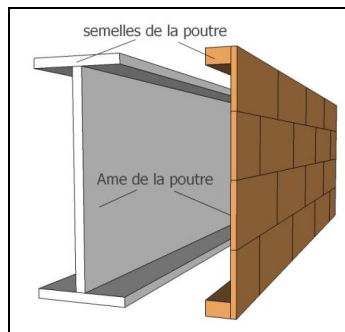


Figure 3. Comparaison d'un plancher avec une poutre en I .

La distribution des efforts vers les murs de contreventement est directement liée à la rigidité du plancher dans son plan. En fait, pour pouvoir déterminer quelle méthode d'analyse et calcul séismique doit être considérée, les planchers sont classés flexible ou rigide. Lorsque le plancher-diaphragme est estimé flexible, il est possible de considérer une méthode basée sur une distribution au prorata des masses pour le transfert de forces. Une telle configuration conduit généralement à une exigence de modélisation plus importante, souvent tridimensionnelle. Dans le cas de diaphragme rigide, la distribution de l'effort sismique se fait au prorata des rigidités relatives des contreventements. La torsion peut être plus facilement abordée dans cette dernière configuration.

3. Analyse de la rigidité des diaphragmes

La rigidité du diaphragme est directement liée à sa déformation dans le plan sous une charge horizontale. De cette manière, pour pouvoir classer le diaphragme en rigide ou flexible, il est nécessaire de mettre en œuvre une modélisation permettant de calculer les déformations sous une sollicitation donnée (souvent répartie) et de comparer ces déformées aux déformées des murs de contreventement [3]. Cette comparaison des rigidités permet d'apprécier le caractère flexible ou rigide du plancher. La détermination de la capacité de déformation du plancher dans son plan est complexe ; un plancher en diaphragme est composé de plusieurs éléments dont les fonctionnements mécaniques sont différents (solives, panneaux, discontinuités, assemblages). La déformation du plancher, et par conséquent sa flexibilité, dépend des effets combinés de sa flexion caractérisée par la traction et la compression dans les chaînages, du

cisaillement dans les panneaux, de la semi-rigidité des connexions entre panneau et solives, des contacts entre panneaux, de la distribution des panneaux et solivage et de la présence de trémies. La méthode de calcul à considérer doit donc prendre en compte ces différents facteurs.

L'*American Forest & Paper Association* [3] propose une méthode analytique simplifiée (Equation 1) pour déterminer la flèche à mi-portée dans le plan d'un plancher :

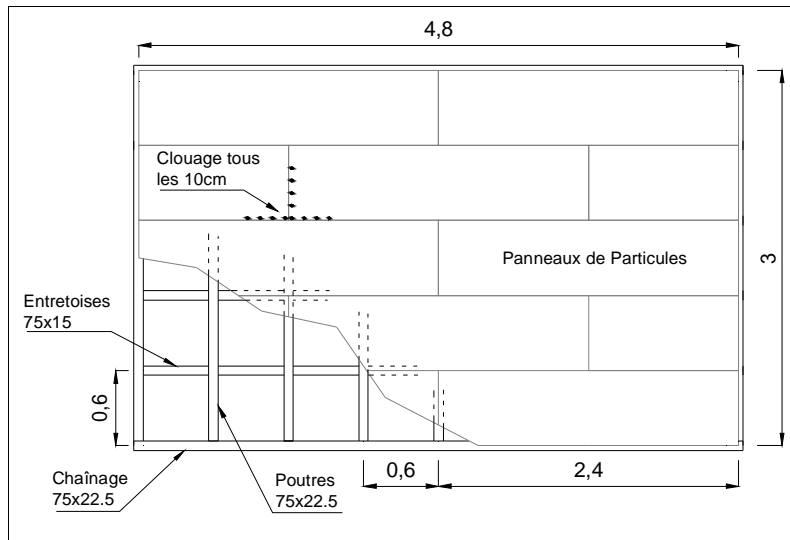
$$\delta_{dia} = \frac{5vL^3}{8EAW} + \frac{vL}{4G_v t_v} + 0.188Le_n + \frac{\sum(x\Delta_c)}{2W} \quad (1)$$

- Où :
- δ_{dia} = Flèche à mi-portée du du plancher [in]
 - v = Effort tranchant par unité de longueur de mur de contreventement [lb/ft]
 - L = Longueur du plancher (portée) [ft]
 - W = Largeur du plancher [ft]
 - A = Section des poutres de chaînage [in²]
 - E = Module d' Young des poutres de chaînage [lb/in²]
 - G_v = Module de Cisaillement des panneaux [lb/in²]
 - t_v = Epaisseur effective des panneaux [in]
 - E = Déformation d'un clou de connexion entre un panneau et les membrures [in]
 - Δ = Glissement dû à la discontinuité des chaînages [in]
 - X = Distance de la discontinuité du chaînage à l'appui plus proche [ft]

Le premier terme de cette formule représente la flèche par effet de moment fléchissant en considérant que les efforts de flexion sont repris uniquement par les poutres de chaînage. Le deuxième terme prend en compte l'effet de l'effort tranchant sur la flèche du plancher en considérant que les efforts de cisaillement sont mobilisés pour les panneaux avec l'hypothèse d'un panneau unique sans discontinuités. La troisième composante de l'équation illustre la flèche par glissement des panneaux dû à la semi-rigidité de la connexion entre les panneaux et le solivage et intègre les effets de discontinuité des panneaux. Finalement, le quatrième terme représente la flèche provenant des discontinuités dans les éléments de chaînage. Cette formule est applicable uniquement pour des chargements uniformément répartis et des conditions d'appuis simples. En plus, cette approche est limitée à des planchers sans trémies et avec une forme rectangulaire [4].

4. Modélisation numérique Cast3m

Dans le but de déterminer l'influence des facteurs qui ne sont pas pris en compte dans les modèles analytiques pour le calcul de la rigidité des planchers-diaphragmes, des modèles numériques, basés sur la méthode des éléments finis, ont été développés dans le cadre de cette étude. Ces modèles intègrent différents niveaux de complexité. Dans une première étape, on a considéré un modèle qui prend en compte uniquement les effets de flexion (M) et d'effort tranchant (V). Par la suite, on a développé un modèle qui intègre la semi-rigidité de la connexion panneaux-solives, finalement un dernier modèle prend en compte les discontinuités et les contacts entre panneaux. A chaque étape de modélisation une analyse comparative est réalisée en considérant les résultats numériques et analytiques. La figure 4 illustre la configuration du plancher étudié. Ces différentes hypothèses de modélisation ont pour objectif d'évaluer l'influence de la semi-rigidité des liaisons panneaux-solives et des discontinuités sur le comportement des panneaux-diaphragmes.



4.1. Modèle 1 – Prise en compte de M et V

La première étape de modélisation considère uniquement les déformations par moment fléchissant et par effort tranchant. Le modèle représente un plancher en diaphragme où des éléments de poutres élastiques modélisent les solives, le chaînage et les entretoises. Une coque-membrane maillée par des éléments à quatre nœuds modélise un grand panneau uniforme connecté de façon rigide aux membrures. Le plancher a été traité comme une poutre simplement appuyée aux extrêmes et chargée uniformément sur toute sa longueur. La figure 5 illustre la comparaison des résultats analytiques et numériques en considérant l'évolution de la flèche à mi-portée. Les données exprimées dans le système international sont transformés en valeurs dans le système de mesures anglo-saxon pour appliquer les formules APFA (Equation 1) dans leurs formes originales.

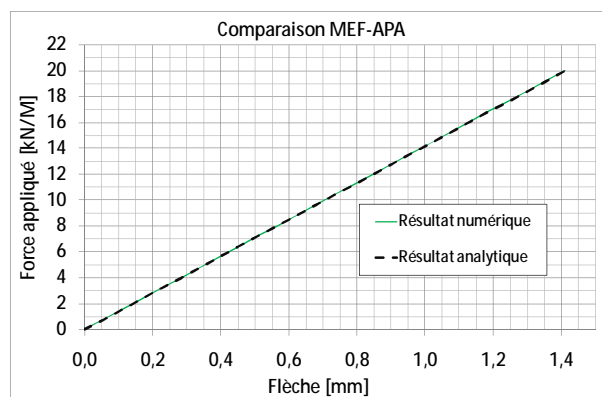


Figure 5. Comparaison des flèches à mi-portée (prise en compte de M et V).

4.2. Modèle 2 – Prise en compte de la semi-rigidité de connexion

Le deuxième modèle a eu pour but l'intégration de l'effet de la semi-rigidité et non-linéarité de la connexion entre un panneau global et le solivage. Vu la complexité de modélisation de cette connexion, un modèle élémentaire de connexion est calé sur des résultats expérimentaux de base. Ce modèle élémentaire représente un clou en cisaillement entre une poutre et un panneau en bois. Les clous sont

modélisés par l'intermédiaire de deux ressorts perpendiculaires, de comportements élastique-plastique, soumis à un effort axial avec un ensemble d'éléments de poutres rigides auxiliaires qui permettent de placer le point de connexion de façon excentrée par rapport à l'axe des membrures (figure 6) [5].

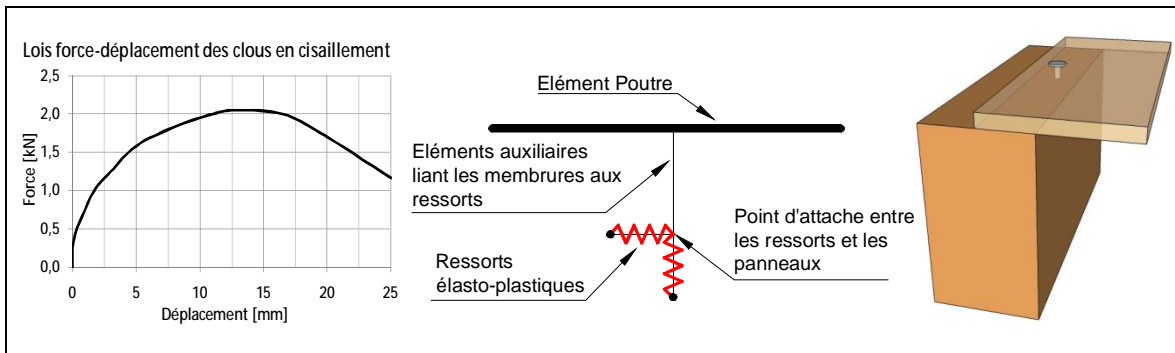


Figure 6. Modèle élémentaire de connexion panneau-poutre.

On a ensuite intégré ce modèle élémentaire dans le modèle numérique du plancher précédemment exposé et constitué de plusieurs clous. La figure 7 souligne l'effet de la semi-rigidité de connexion entre le panneau et les membrures, sur la flèche à mi-portée.

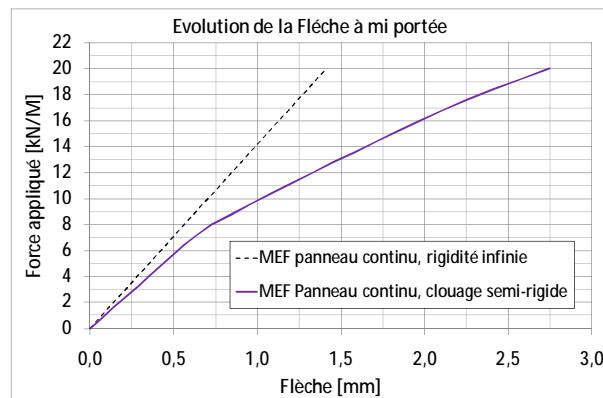


Figure 7. Effet de la semi-rigidité de connexion sur la flèche à mi-portée.

4.3. Modèle 3 – Prise en compte des discontinuités des panneaux

Un troisième modèle numérique a été développé afin de prendre en compte l'effet des discontinuités des panneaux. Dans cette approche on a intégré la non-linéarité de connexion telle qu'exposée dans le modèle 2 et on a considéré en plus plusieurs panneaux disposés en quinconce (figure 4). Outre le clouage périphérique des panneaux, le contact entre extrémités de panneaux a été intégré dans le modèle. La figure 8 rend compte de l'effet de cette distribution des panneaux élémentaires qui constituent le diaphragme et du contact entre eux. Le modèle analytique est basé sur les trois premiers termes de la formule APFA (Equation 1). Des discontinuités de chaînage, qui peuvent être des sources de non linéarité, n'ont pas été considérées dans cette étude. Dans la formule APFA, le comportement des assemblages cloués est modélisé par une fonction exponentielle qui est calée sur un comportement élastique. La bibliographie rapporte le caractère pessimiste de cette modélisation [6] [7].

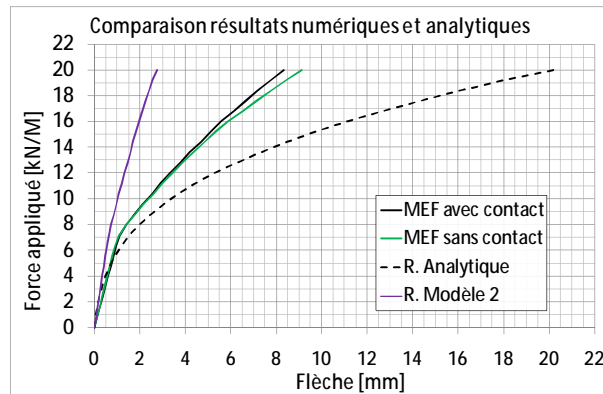


Figure 8. Flèches à mi-portée avec prise en compte de la non-linéarité des connexions et des discontinuités de panneaux.

5. Analyse de résultats

Les résultats sont analysés en s'appuyant sur les courbes force-flèche à mi-portée du panneau diaphragme. Dans le modèle 1 (figure 5), on peut observer une bonne concordance entre les résultats numériques et analytiques. Ce modèle représente le cas d'une connexion rigide entre le panneau continu et les membrures du plancher. Ainsi, le plancher peut être assimilé à une poutre de grande hauteur en prenant en compte uniquement les deux premiers termes de l'équation 1. Dans ce cas, on observe que 88% de la flèche totale provient de l'effet de l'effort tranchant, ceci donne un indice sur l'importance des propriétés mécaniques du panneau utilisé sur la rigidité totale du plancher.

Une campagne d'essais a été réalisée sur des assemblages élémentaires cloués entre morceaux de panneaux et de membrures. Elle a permis d'alimenter le modèle numérique 2 qui prend en compte la non-linéarité de la connexion entre les panneaux et les membrures. Les résultats rapportés en figure 7 montrent une diminution constante de la rigidité du plancher (20%) jusqu'à une charge appliquée de 8kN/m, ensuite, la plastification de la connexion fait diminuer la rigidité progressivement jusqu'à 49% pour une charge maximale appliquée de 20kN/m. Ces résultats illustrent la forte influence de la semi-rigidité et la non-linéarité de la connexion sur la rigidité du plancher. Ainsi, dans le cas des planchers soumis à des chargements qui entraînent la plastification de la connexion, on pourrait définir différentes phases d'évolution de la rigidité en flexion dans le plan pour différents niveaux de chargement appliqué. Ceci nous amène à définir à terme des rigidités sécantes de diaphragmes en fonction du niveau de sollicitation appliquée.

Le modèle 3, qui englobe le modèle 2 et tient compte de l'évolution ou non des contacts entre panneaux, a permis de d'évaluer la sensibilité de la rigidité du plancher aux discontinuités des panneaux. Deux approches numériques ont été considérées ; un modèle avec contact entre les panneaux et un autre sans contact. Les résultats obtenus numériquement montrent que l'effet du contact entre les panneaux devient plus important lorsque le chargement augmente ou la rigidité de connexion diminue. En comparant les résultats du modèle avec contact et ceux obtenus par le modèle avec un panneau uniforme (modèle 2), on peut noter que le fait d'intégrer les discontinuités des panneaux se traduit par une diminution de la rigidité d'environ 40% pour une charge de 6,4kN/m, et cette diminution atteint quasiment 70% pour un chargement de 20 kN/m.

On a par ailleurs calculé analytiquement la flèche du diaphragme en prenant en compte le troisième terme de l'équation 1. Ce terme a été déduit du rapport entre l'allongement de la diagonale de chaque panneau et la flèche du diaphragme due à l'effort tranchant. Dans cette approche, il est pris égal au rapport entre la déformation des clous de chaque panneau et la flèche totale du plancher due au glissement des panneaux. Cette hypothèse est uniquement valable lorsque les clous ne sont pas plastifiés. Quand la plastification des

clous commence à se développer, l'approche analytique se place du côté pessimiste avec une grande divergence par rapport à la modélisation numérique et aux résultats expérimentaux [6][7].

A titre d'application du modèle 3, une comparaison a été conduite entre plusieurs planchers-diaphragmes dont la seule différence réside dans le calepinage des panneaux. La figure 9 montre l'évolution des courbes force-flèche de diaphragmes avec trois dispositions différentes de panneaux. On peut noter que les rigidités des configurations 2 et 3 baissent légèrement lorsque la charge appliquée augmente. En réalité, la configuration des panneaux peut avoir un effet plus important sur des planchers plus élancés.

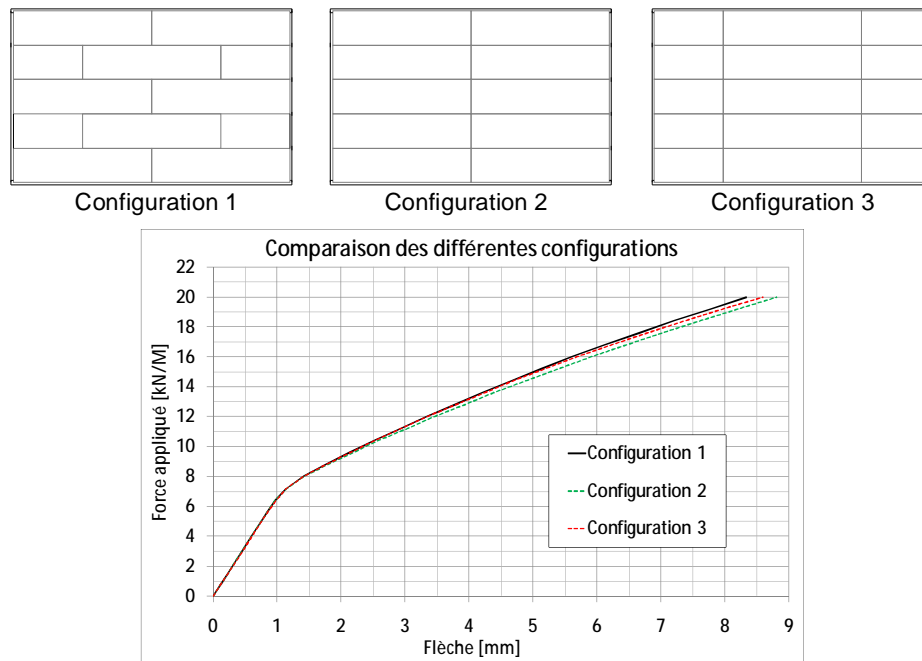


Figure 9. Courbes force-flèche pour différentes configurations de panneaux.

6. Conclusions

Le travail présenté dans cette étude donne les bases de modélisation numérique d'une structure assez complexe comme un plancher en diaphragme. Le grand nombre de facteurs qui influencent le comportement mécanique du plancher, rend leur prise en compte pratique difficile à mettre en œuvre. Actuellement une méthode analytique est proposée mais elle est limitée à des configurations géométriques simples sous faible chargement. Ainsi, les approches numériques deviennent attractives pour prendre en compte des phénomènes non linéaires comme la plastification des composants et les discontinuités entre éléments. Les différentes étapes de modélisation ont montré des résultats cohérents et ont permis de développer un modèle complexe qui prend en compte les discontinuités des panneaux, la non-linéarité de connexion et l'effet de contact. Ce type de modèle pourra être étendu à des configurations géométriques et matérielles plus larges, comme des diaphragmes sur appuis multiples, des formes de planchers autres que rectangulaires et des planchers présentant des trémies ou des joints de fractionnement.

7. Références

- [1] Racher P. et al., *Structures en bois aux états limites (Step 2)* - Introduction à l'Eurocode 5 (calcul de structure), Editions Eyrolles 2001.
- [2] Wescott J., *Horizontal stiffness of wood diaphragms*, Thesis of Master of Science in civil engineering. Virginia Polytechnic Institute. 2005.
- [3] *Wind and Seismic* – « Special design provisions for wind and seismic » American forest & paper association. Edition 2005.
- [4] Curtis E., *Deflection of Light Frame Wood Diaphragms* , Report, Washington State University. August 2009.
- [5] Judd J. P. , Fonseca F. S., *Analytical Model for Sheathing-to-Framing Connections in Wood Shear Walls and Diaphragms*, J. Struct. Engrg. (ASCE), Volume 131, Issue 2, pp. 345-352 (February 2005).
- [6] Falk R., Itani R.. *Prediction of diaphragm displacement*, International Conference on Timber Engineering. Forest Products Research Society. Washington State University, September 1988.
- [7] Tissell J., Elliot J., *Plywood Diaphragms*, Research Report n° 138 APA The Engineered Wood Association. 2004.
- [8] *Diaphragms and shear walls* – « Design and construction guide » APA The Engineered Wood Association. 2007.