

DIMENSIONNEMENT DES COUVERTINES

ESSAIS & MODÉLISATIONS

OCTOBRE 2021



AVANT-PROPOS

Avec le programme PROFEEL, la filière Bâtiment s'est rassemblée pour répondre collectivement aux défis de la rénovation énergétique. 16 organisations professionnelles ont été à l'initiative de cette démarche et, continuent aujourd'hui à la porter activement.

PROFEEL se compose concrètement de 9 projets, positionnés sur trois grands enjeux : favoriser le déclenchement des travaux de rénovation, garantir la qualité des travaux réalisés et consolider la relation de confiance entre les professionnels. Ces projets s'appuient sur l'innovation, qu'elle soit technique ou numérique, afin de mieux outiller les professionnels du bâtiment, d'améliorer les pratiques sur le marché de la rénovation énergétique et de garantir la qualité des travaux réalisés. Ces outils permettront d'accompagner les acteurs durant toutes les étapes d'un projet de rénovation : en amont, pendant et après les travaux.

Dans le cadre du projet BONNES PRATIQUES, un des 9 projets PROFEEL, 14 nouveaux outils pratiques sont développés pour accompagner les professionnels dans la conception, la mise en œuvre et la maintenance de solutions techniques, clés ou innovantes de rénovation énergétique. Cette nouvelle collection d'outils s'inscrit dans la continuité des référentiels techniques produits dans le cadre de précédents programmes portés par la filière Bâtiment : PACTE et RAGE.

Le présent document est le fruit d'un travail collectif des différents acteurs de la filière bâtiment en France.

Pour plus d'information : <https://programmeprofeel.fr/>

PARTENAIRES PROFEEL :

Pouvoirs Publics



Porteurs



Financiers



Filière Bâtiments



PROFEEL, un programme financé par le dispositif des certificats d'économie d'énergie (CEE)



SOMMAIRE

| | | |
|---|---------------------------------------|----|
| ① | INTRODUCTION | 4 |
| ② | DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE | 5 |
| ③ | ESSAIS À LA RUINE | 6 |
| ④ | CHARGES APPLIQUÉES SUR UNE COUVERTINE | 9 |
| ⑤ | MODÉLISATION DES COUVERTINES | 10 |
| ⑥ | RÉSULTATS DES CALCULS ET DES ESSAIS | 12 |
| ⑦ | CONCLUSION | 24 |



VERSION
Initiale

DATE DE LA PUBLICATION
Octobre 2021

MODIFICATIONS

1

INTRODUCTION

Dans le cadre du projet PROFEEL « Dimensionnement des couvertines », deux campagnes d'essais au vent ont été réalisées, par le CTICM, sur deux maquettes de couvertines à l'échelle 1, au CSTB-Nantes.

Suite à la première campagne d'essais qui a permis d'évaluer les coefficients de pression (c_{pe} , c_{pi} et c_{pnet}), pour deux configurations de couvertines (non ventilée et ventilée), des essais à la ruine ont été réalisés. En parallèle, des modèles de calcul numériques ont été développés.

Le présent rapport, donne les résultats de calcul pour les deux configurations de couvertines. Des calculs manuels, linéaires et non-linéaires ont été réalisés pour des portions

de couvertine de 3 x 0,47 m ; mêmes dimensions que les couvertines testées en soufflerie. Les résultats des calculs non-linéaires ont été ensuite comparés aux résultats des essais à la ruine.

L'objectif de ces calculs est de valider les modèles numériques qui ont servis pour alimenter le Rapport PROFEEL « Dimensionnement des couvertines - Octobre 2021 ». Pour rappel, ce rapport donne, sous forme de tableaux, les caractéristiques des couvertines en fonction de la hauteur du bâtiment et de sa localisation (régions de neige et de vent).

2

DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE

2

1

RÉFÉRENCES NORMATIVES

- **NF EN 1991-1-4** – Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-4 : Actions générales – Actions du vent. AFNOR. Novembre 2005.
- **NF EN 1991-1-4/NA** – Annexe Nationale à la NF EN 1991-1-4. AFNOR. Mars 2008.
- **NF EN 1991-1-3** – Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-3 : Actions générales – Charges de neige. AFNOR. Avril 2004.
- **NF EN 1991-1-3/NA** – Annexe Nationale à la NF EN 1991-1-3 : 2004. AFNOR. Mai 2007.
- **NF EN 1993-1-5** – Eurocode 3 – Calcul des structures en acier – Partie 1-5 : plaques planes. AFNOR. Mars 2007.

2

2

AUTRES DOCUMENTS

- **Recommandations professionnelles RAGE** – Bardages en acier protégé et en acier inoxydable. Juillet 2014
- **Rapport PROFEEL** – Dimensionnement des couvertines – Octobre 2021.
- Rapports d'essais du CSTB : EN-CAPE 20.183 C – V1 et EN-CAPE 21.100 C – V1

3

ESSAIS À LA RUINE

3

1

DESCRIPTION

Les maquettes de couvertines (voir §3.2) ont été exposées à un vent de vitesse uniforme égale à la vitesse de pointe retenue. Pour le calcul de cette vitesse de pointe, on considère un site dont l'exposition est représentative :

- d'une région 3 du vent, soit $V_b = 26$ m/s ;
- d'une rugosité 0 correspondant à une catégorie de terrain mer ou zone côtière exposée aux vents de mer, lacs et plans d'eau parcourus par le vent sur une distance de 5 km ;
- d'une hauteur du bâtiment de 40 mètres ;
- à l'Etat Limite de Service (ELS).

La pression dynamique ELS (Etat Limite de Service) associée à cette exposition est de 1556 Pa. La pression dynamique à l'ELU (Etat Limite Ultime) serait de 2334 Pa.

Les essais ont été réalisés pour une direction de 315° des maquettes ; une des directions les plus défavorables selon les résultats de la première campagne d'essais (voir Figure 1).

Pour la convertine non ventilée, les essais ont été stoppés à une vitesse du vent de 210 km/h. La pression dynamique correspondante est de 2040 Pa. Aucune ruine n'a été constatée.

Pour la convertine ventilée, les essais ont été stoppés à une vitesse du vent de 142 km/h. La pression dynamique correspondante est de 930 Pa. Pour cette vitesse, une déformation importante de la couverture a été constatée.

Les résultats des essais à la ruine sont donnés dans le paragraphe 6 en comparaison avec les résultats des calculs numériques.

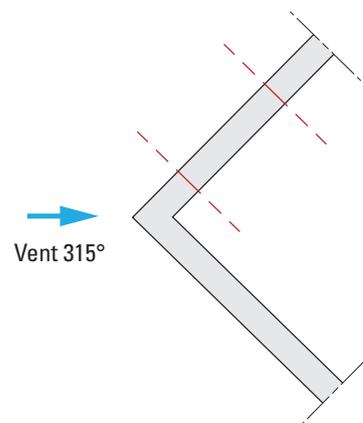


FIGURE 1 Orientation des maquettes pour les essais à la ruine

3

2

CARACTÉRISTIQUES DES MAQUETTES

3.2.1 CONFIGURATION 1 : COUVERTINE NON VENTILÉE

La Figure 2 donne les dimensions de la maquette utilisée pour les essais à la ruine. Celle-ci est composée d'une cornière en acier de 1,5 mm fixée sur le support, côté toiture. La couverture est fixée d'un côté sur la cornière moyennant des vis de 5,5 x 28 mm et rondelles de 14 mm, et de l'autre côté sur un bardage en acier, conforme aux

Recommandations Professionnelles RAGE de juillet 2014 « Bardages en acier protégé et en acier inoxydable », avec des vis de 5,5 x 28 mm et rondelles de 14 mm. L'entraxe des fixations de la couverture sur la cornière et le bardage est de 500 mm sur une aile de la couverture, et de 250 mm sur l'autre.

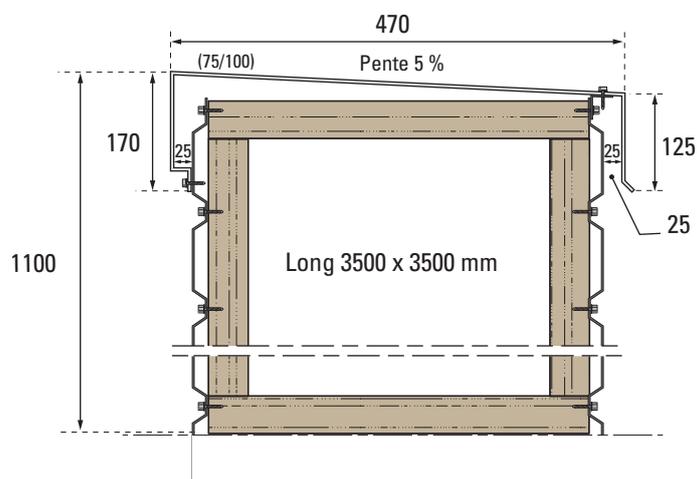


FIGURE 2 Dimensions de la maquette utilisée pour les essais à la ruine - Couverture non ventilée (dimensions en mm)

Caractéristiques de la couverture et de la cornière :

- Couverture :
 - Epaisseur : 0,75 mm
 - Largeur : 470 mm
 - Longueur : 3 m
 - Pente : 5 %
 - Nuance de l'acier : S320 GD
 - Fixations sur la cornière filante : vis de 5,5 x 28 mm et rondelles de 14 mm
 - Entraxe des fixations : 500 mm sur une aile et 250 mm sur l'autre (cf. Figure 9)
- Cornière en acier :
 - Dimensions : 80/30
 - Epaisseur : 1,5 mm
 - Nuance de l'acier : S280 GD

3.2.2 CONFIGURATION 2 : COUVERTINE VENTILÉE

La Figure 3 donne les dimensions de la maquette utilisée pour les essais à la ruine. La fixation de la couverture, en alliage d'aluminium, est assurée moyennant des pattes fixées sur le support par des vis. Les fixations des pattes sur le support ont été dimensionnées pour éviter la ruine à ce niveau.

Du côté toiture, la couverture est fixée sur les pattes avec des vis de 5,5 x 25 mm et rondelles. Du côté façade, elle est clipsée sur les pattes. L'espacement des pattes est de 1000 mm sur une aile de la maquette, et de 500 mm sur l'autre.

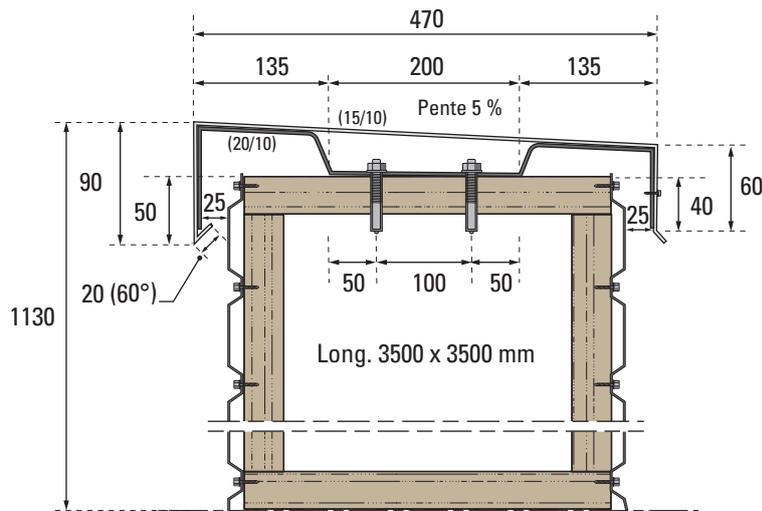


FIGURE 3 Dimensions de la maquette utilisée pour les essais à la ruine - Couverture ventilée (dimensions en mm)

Caractéristiques de la couverture et des pattes :

- Couverture en alliage d'aluminium :
 - Épaisseur : 1,5 mm
 - Largeur : 470 mm
 - Longueur : 3 m
 - Pente : 5%
 - Limité d'élasticité : 80 MPa
 - Résistance ultime en traction : 190 MPa
 - Nuance : EN AW-5754 H111
 - Fixations sur les pattes : vis de 5,5 x 28 mm et rondelles de 14 mm
 - Entraxe des fixations : 1000 mm sur une aile et 500 mm sur l'autre (voir Figure 15)
- Pattes de fixations :
 - Pattes en tôle GALVA de nuance S280 GD
 - Épaisseur : 2 mm
 - Largeur : 100 mm
 - Pattes fixées au support par des vis
 - Espacement des pattes : 1000 mm sur une aile et 500 mm sur l'autre

4

CHARGES APPLIQUÉES SUR UNE COUVERTINE

4

1

NOTATIONS

- G : charges permanentes (N/m²)
- W_k : charge de vent en dépression (ascendante) (N/m²)

La charge de neige n'est pas prise en compte ici, parce que les calculs sont faits pour comparer les résultats des simulations numériques à ceux des essais à la ruine.

4

2

CHARGE DE VENT

La charge de vent est définie par l'expression suivante, selon l'Eurocode 1991-1-4 et l'Eurocode 1991-1-4/AN :

$$W_k = c_{pnet} \times q_p(z) \quad (N/m^2)$$

4.2.1 PRESSION DYNAMIQUE DE POINTE

Les pressions dynamiques de pointe $q_p(z)$ relevées lors des essais sont :

- Couvertine non ventilée : $q_p(z) = 2040 \text{ N/m}^2$
(Vitesse du vent : 210 km/h)

Avec :

c_{pnet} : coefficient de pression du vent (voir §4.2.2)

$q_p(z)$: pression dynamique de pointe à la hauteur de référence z (N/m²) (voir §4.2.1)

- Couvertine ventilée : $q_p(z) = 930 \text{ N/m}^2$
(Vitesse du vent : 142 km/h)

Ces pressions ont été relevées pour les vitesses maximales atteintes lors des essais à la ruine.

4.2.2 COEFFICIENTS DE PRESSION

Les coefficients de pression ont été évalués lors de la première campagne d'essais en soufflerie, réalisés au CSTB - Nantes. Pour la direction retenue des maquettes dans les essais à la ruine (315°), les coefficients de pression maximale (près de l'angle) sont :

- Couvertine non ventilée : $c_{pnet} = c_{pe} = -1,22$
- Couvertine ventilée : $c_{pnet} = -1,15$

La charge du vent appliquée sur la couvertine est donc :

- Couvertine non ventilée :

$$W_k = c_{pnet} \times q_p(z) = -1,22 \times 2040 = -2488,8 \text{ N/m}^2$$

- Couvertine ventilée :

$$W_k = c_{pnet} \times q_p(z) = -1,15 \times 930 = -1069,5 \text{ N/m}^2$$

5

MODÉLISATION DES COUVERTINES

Pour chaque configuration de couverture (non ventilée et ventilée), une aile a été modélisée dans le logiciel de calcul aux éléments finis ANSYS v 20.1.

Pour la couverture non ventilée, le modèle est présenté sur la Figure 4. Sur la Figure 5, les fixations gauches,

côté façade, sont supposées être sur appuis simples. Le contact entre la couverture et le bardage (côté façade) est modélisé par des ressorts qui travaillent uniquement en compression. La cornière filante est supposée être encastree sur le support.

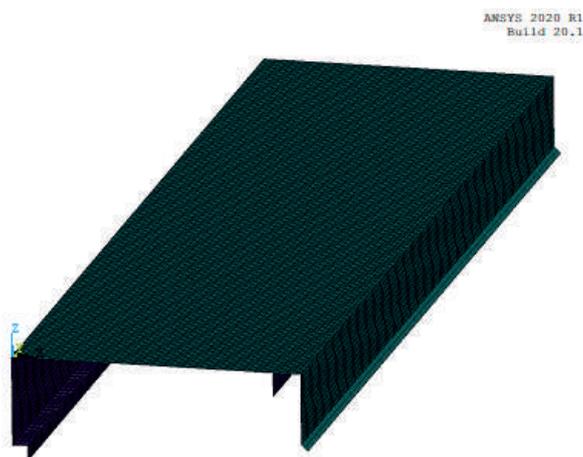


FIGURE 4 Couverture non ventilée (vue du modèle en 3D)

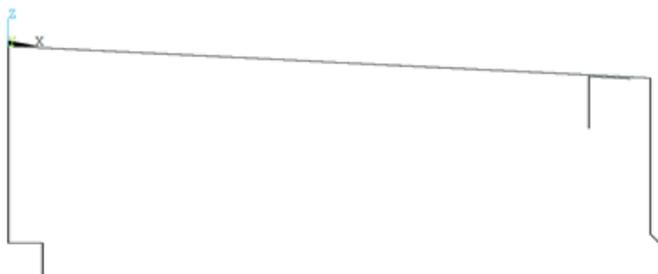


FIGURE 5 Couverture non ventilée (section transversale)

Pour la couvertine ventilée, le modèle est présenté sur la Figure 6 (vue en 3D) et la Figure 7 (section transversale). Puisque les pattes sont fixées sur un support rigide (béton/bois/acier), des ressorts dont la rigidité est très

élevée, travaillant uniquement en compression, sont modélisés sur toute la surface de la patte en contact avec le support.

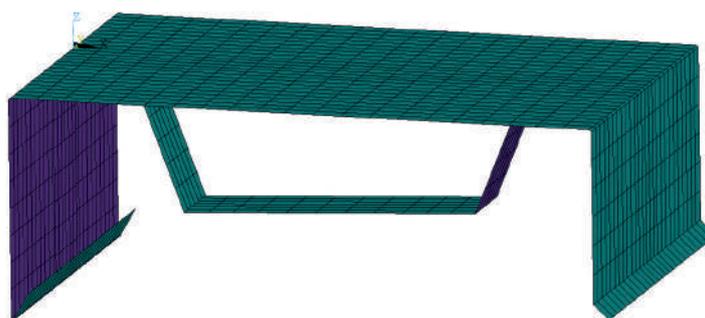


FIGURE 6 Couvertine ventilée (vue du modèle en 3D)

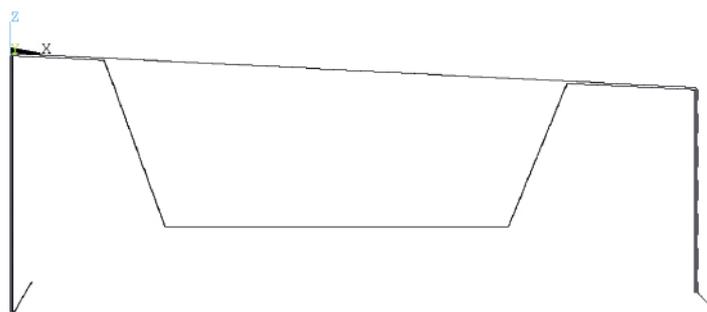


FIGURE 7 Couvertine ventilée (section transversale)

Comme la couvertine est un élément mince qui est susceptible d'avoir des grands déplacements hors-plan, les calculs ont été effectués en prenant en compte le comportement non-linéaire géométrique (grands

déplacements) ainsi que le comportement du métal de type élasto-plastique avec écrouissage, selon la norme NF EN 1993-1-5 – Annexe C (voir Figure 8).

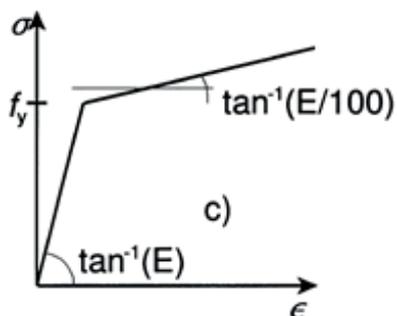


FIGURE 8 Comportement élasto-plastique avec écrouissage du métal (NF EN 1993-1-5 – Annexe C)

6

RÉSULTATS DES CALCULS ET DES ESSAIS

Le dimensionnement des couvertines est effectué par calcul non-linéaire. Néanmoins, un calcul manuel et un calcul linéaire ont été effectués, en amont, pour vérifier

et valider les modèles numériques. Les résultats du calcul non-linéaire sont ensuite comparés aux résultats des essais à la ruine.

6

1

COUVERTINE NON VENTILÉE

La Figure 9 montre les efforts exercés sur la couvertine ainsi que les dimensions de celle-ci (l'aile de la couvertine avec un entraxe des fixations de 0,5 m).

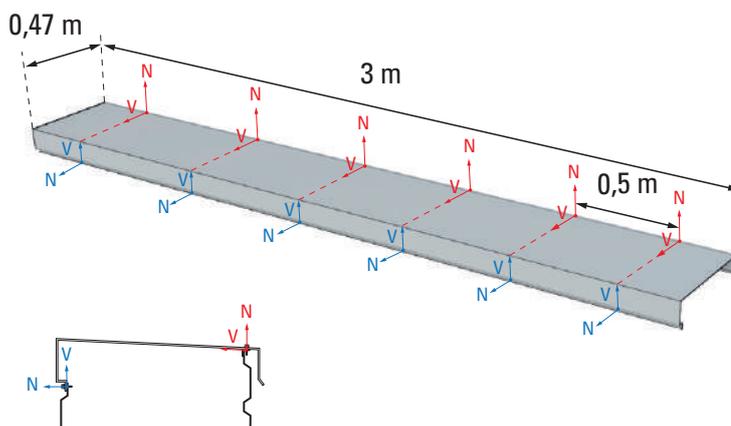


FIGURE 9 Directions des efforts et dimensions de la couvertine (V : effort tranchant ; N : effort axial (arrachement))

6.1.1 CALCUL MANUEL (AUTO-CONTROL)

Les charges appliquées sur la couvertine sont :

Poids propres de la couvertine : $G = -130,4 \text{ N}$

Vent ascendant : $W_k = 3509,2 \text{ N}$

La somme des charges appliquées sur la couvertine est :

$$W_k + G = 3509,2 - 130,4 = 3378,8 \text{ N}$$

La couvertine a été assimilée à une poutre sur appuis simples de section rectangulaire avec une longueur de 1 mètre.

La charge répartie par mètre (q), est :

$$q = 0,5 \times (W_k + G) / 0,47 / 3$$

$$q = 0,5 \times 3378,8 / 0,47 / 3 = 1198,1 \text{ N/m}$$

Le moment fléchissant au milieu de la couvertine, est :

$$M = \frac{qL^2}{8} = \frac{1198,1 \times 0,47^2}{8} = 33,08 \text{ N.m}$$

La contrainte normale au milieu de la couvertine (épaisseur = 0,75 mm, épaisseur de zinc = 0,04 mm), est :

$$\sigma = \frac{M \times v}{I} = \frac{M \times t/2}{\frac{bt^3}{12}} = \frac{6 \times M}{bt^2} = \frac{6 \times 33,08 \times 1000}{1000 \times (0,75 - 0,04)^2} = 393,7 \text{ MPa}$$

6.1.2 CALCUL LINÉAIRE (AUTO-CONTROL)

Un calcul élastique linéaire a été effectué en considérant le poids propre de la couvertine (G) ainsi qu'une charge surfacique de vent (W_k).

Les charges appliquées sur la couvertine, sont (calcul manuel) :

Poids propres de la couvertine : $G = -130,4 \text{ N}$

Vent ascendant : $W_k = 3509,2 \text{ N}$

La somme des charges appliquées sur la couvertine est :

$$G + W_k = 3509,2 - 130,4 = 3378,8 \text{ N}$$

Selon le calcul numérique linéaire par la méthode d'éléments finis, la résultante des réactions verticales aux appuis gauches (côté façade) et de celles aux appuis sur la cornière filante (côté toiture) est :

Sous poids propre : $R_G = -130,5 \text{ N}$

Sous charges de vent : $R_W = 3509,2 \text{ N}$

Résultante : $R_{Z_{tot}} = 3378,7 \text{ N}$

La résultante des réactions verticales est à peu près égale à la somme totale des charges obtenue par un calcul manuel (3378,8 N).

Les efforts dans chacune des vis de fixation de la couvertine sur la façade sont :

Effort tranchant : $V = 275,7 \text{ N}$

Effort axial (arrachement) : $N = 381,7 \text{ N}$

Les efforts dans chacune des vis de fixation de la couvertine sur la cornière (côté toiture) sont :

Effort tranchant : $V = 83,4 \text{ N}$

Effort axial (arrachement) : $V = 581,5 \text{ N}$

Selon le calcul numérique, la contrainte normale (suivant l'axe X) au milieu de la couvertine est d'environ 370 MPa (voir Figure 10). Elle est légèrement inférieure à celle obtenue par un calcul manuel (393,7 MPa).

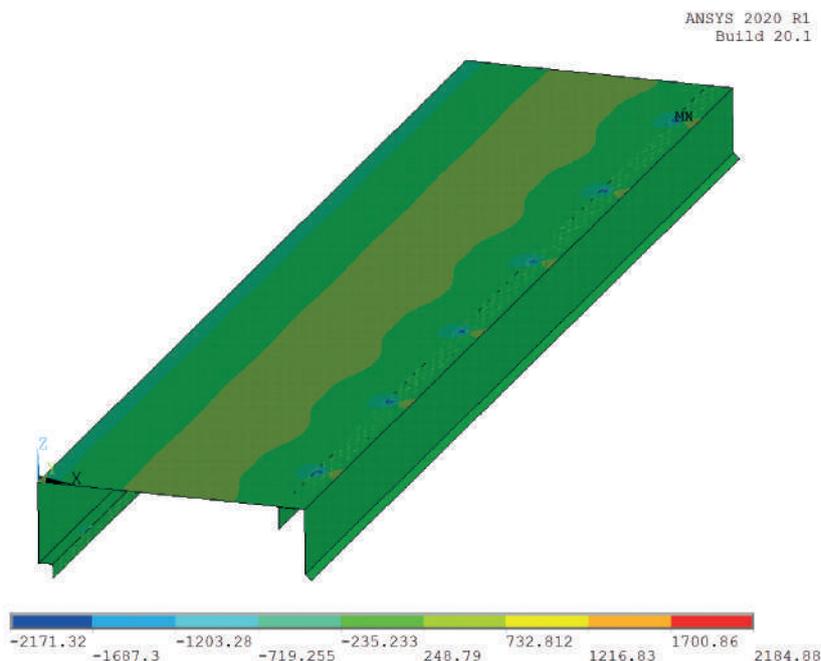


FIGURE 10 Contrainte normale (suivant l'axe X) dans la couvertine (en MPa)

6.1.3 CALCUL NON-LINÉAIRE

Les résultats du calcul non-linéaire sont donnés ci-dessous :

La résultante des réactions verticales : $R_{Z_{tot}} = 3301,4 \text{ N}$

Les efforts dans chacune des vis de fixation de la couvertine sur le bardage (côté façade) sont :

Effort tranchant : $V = 259$

Effort axial (arrachement) : $N = 400 \text{ N}$

Les efforts dans chacune des vis de fixation de la couverture sur la cornière (côté toiture) sont :

$$\begin{aligned} \text{Effort tranchant :} & V = 81,9 \text{ N} \\ \text{Effort axial (arrachement) :} & N = 823,7 \text{ N} \end{aligned}$$

Les efforts dans les vis de fixation de la couverture, côté façade et côté toiture, obtenus par calcul linéaire et non-linéaire sont comparables, sauf pour la dernière ligne à cause d'une redistribution des efforts due à une légère plastification de la zone autour de la vis de fixation (voir Tableau 1).

| | Calcul linéaire | Calcul non-linéaire |
|--------------------------|-----------------|---------------------|
| Côté façade | | |
| Effort tranchant (V) | 275,7 N | 259,0 N |
| Effort d'arrachement (N) | 381,7 N | 400 N |
| Côté toiture | | |
| Effort tranchant (V) | 83,4 N | 81,9 N |
| Effort d'arrachement (N) | 581,5 N | 823,7 N |

TABLEAU 1 Efforts dans les vis de fixation obtenus par un calcul linéaire et un calcul non-linéaire

La Figure 11 donne la contrainte normale (suivant l'axe X) dans la couverture. Seules les zones autour des vis de fixation de la couverture sur la cornière sont légèrement plastifiées avec une déformation maximale de 1,68%.

En se référant à la NF EN 1993-1-3 Tableau 8.2, les résistances suivantes sont calculées :

La résistance au poinçonnement pour la fixation travaillant en traction :

$$F_{d,RK} = 1417,5 \text{ N}$$

La résistance à l'arrachement pour la fixation travaillant en traction :

$$F_{a,RK} = 1336,5 \text{ N}$$

La résistance à la pression diamétrale pour la fixation travaillant au cisaillement :

$$F_{b,RK} = 2906,2 \text{ N}$$

La résistance à la pression diamétrale ainsi que la résistance à l'arrachement sont satisfaisantes, car les efforts sont inférieurs aux valeurs de la résistance.

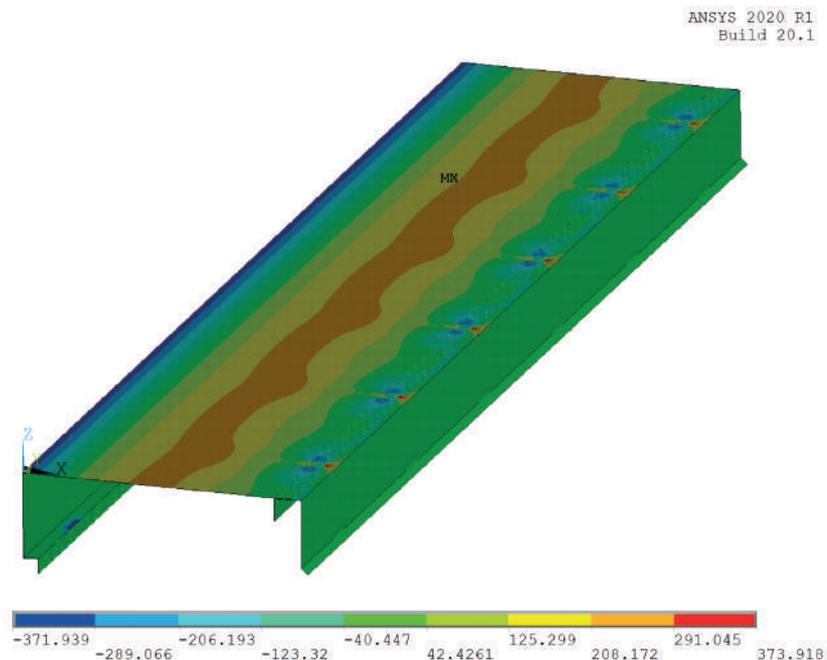


FIGURE 11 Contrainte normale (suivant l'axe X) dans la couverture (en MPa)

6.1.4 COMPARAISON DES RÉSULTATS DU CALCUL NON-LINÉAIRE ET DES ESSAIS À LA RUINE

Les résultats des simulations numériques ne sont pas tout à fait comparables aux résultats des essais à la ruine, puisque l'hypothèse d'une charge uniforme du vent est utilisée dans les simulations numériques (avec les coefficients de pression maximaux relevés lors de la première campagne d'essais) et non une charge réelle (répartition non uniforme) en tout point de la couverture (voir Figure 12). Les essais à la ruine ont été stoppés à une vitesse du vent de 210 km/h. La pression dynamique correspondante est de 2040 Pa. Aucune ruine n'a été constatée.

La Figure 13 donne la contrainte plastique autour d'une fixation de la couverture sur la cornière ainsi qu'une photo prise à la fin de l'essai à la ruine.

La Figure 14 donne le déplacement de la couverture en mm (environ 30 mm) pour un entraxe des fixations de 250 mm. Lors des essais à la ruine, des légères vibrations dont l'amplitude est d'environ 10 à 20 mm, ont été observées pour cet entraxe.

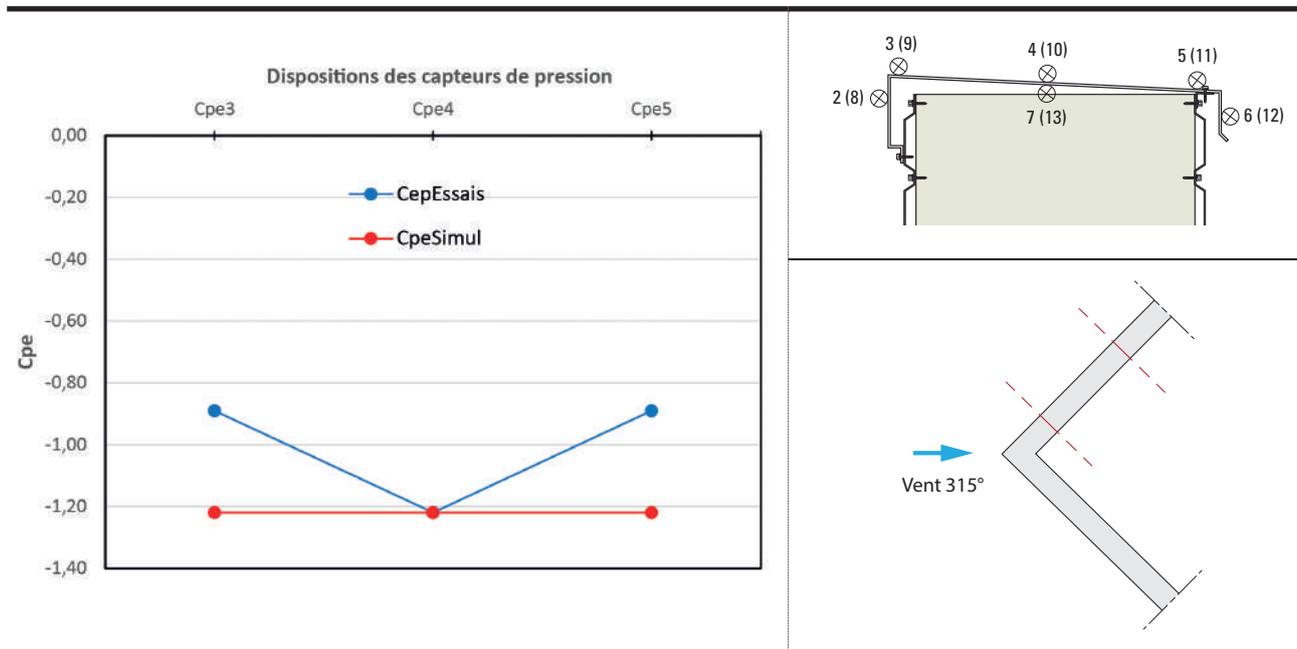


FIGURE 12 Coefficients de pression c_{pe} résultant des essais (en bleu) ainsi que le coefficient de pression utilisé dans les simulations (en rouge)

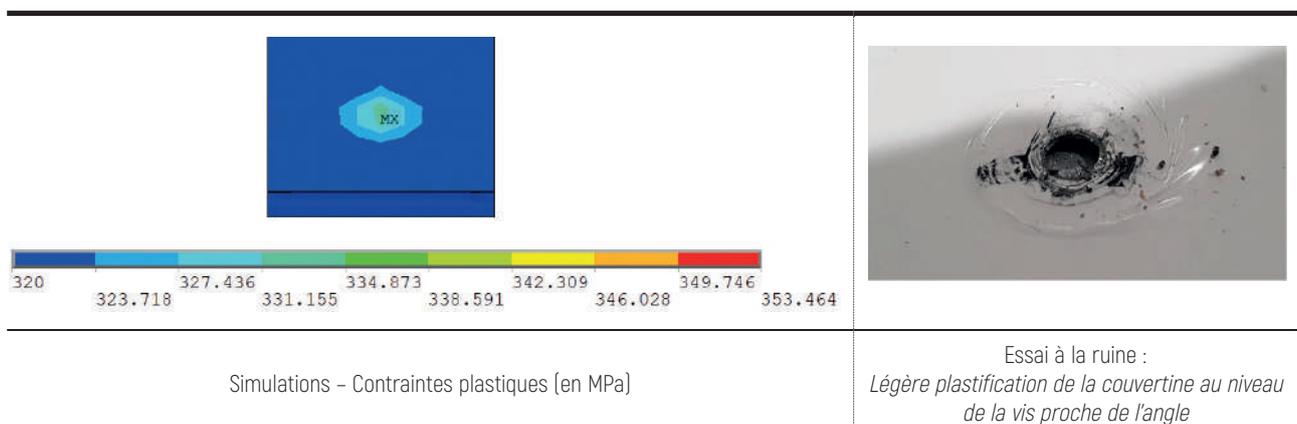


FIGURE 13 Contraintes plastiques équivalentes (zone autour d'une fixation couverture-cornière)

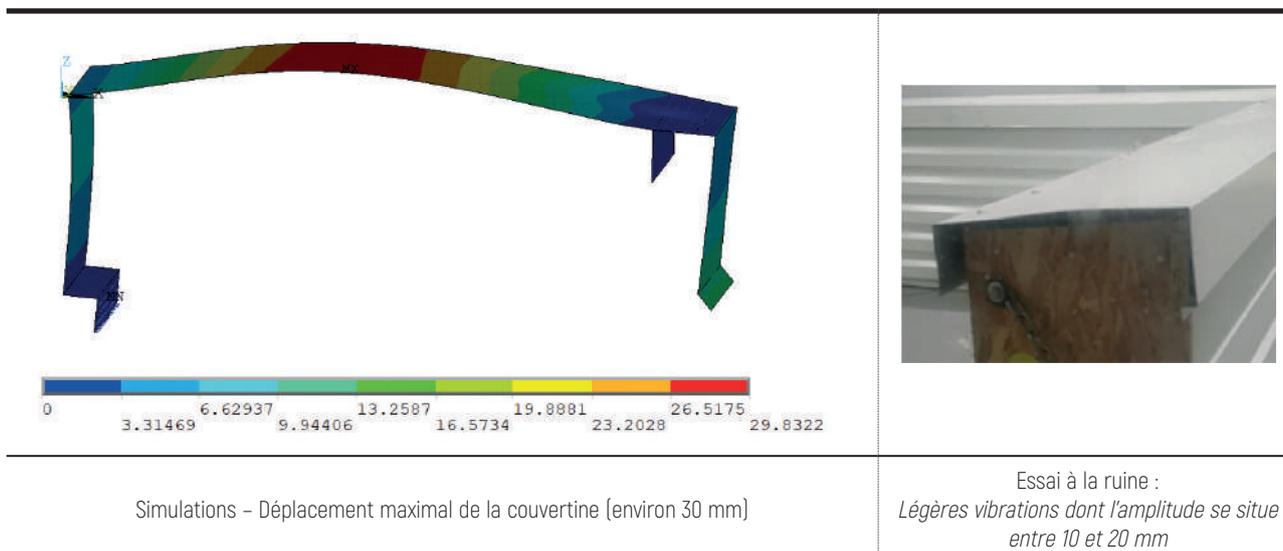


FIGURE 14 Déplacement de la couvertine (en mm) et amplitude maximale de vibrations observées lors de l'essai à la ruine

6

2

COUVERTINE VENTILÉE

La Figure 15 montre les efforts exercés sur la couvertine ainsi que les dimensions de celle-ci (l'aile de la couvertine avec un entraxe des pattes de 1 m).

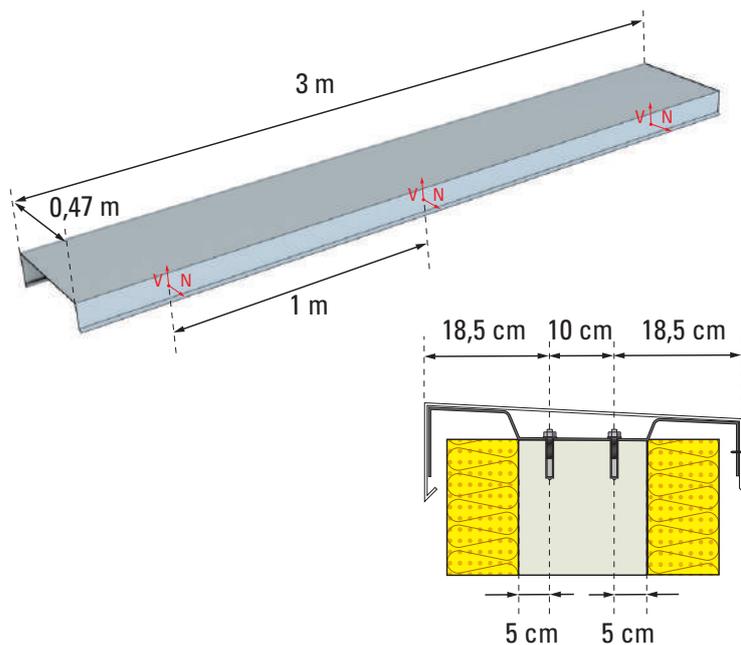


FIGURE 15 Directions des efforts et dimensions de la couvertine (V : effort tranchant ; N : effort axial (arrachement))

6.2.1 CALCUL MANUEL (AUTO-CONTROL)

Les charges appliquées sur la couvertine (en alliage d'aluminium) sont :

Poids propres de la couvertine et des pattes : $G = -107,1 \text{ N}$

Vent ascendant : $W_k = 1508 \text{ N}$

La somme totale des charges est :

$$W_k + G = 1508 - 107,1 = 1400,9 \text{ N}$$

Pour vérifier les calculs numériques, la patte a été assimilée à deux consoles encastrées au droit des vis de fixation sur le support.

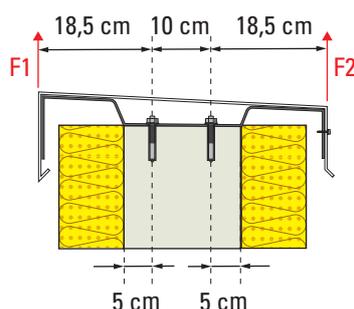


FIGURE 16 Modélisation d'une patte

La charge répartie par mètre (q) :

$$q = 1,0 \times (W_k + G) / 0,47 / 3$$

$$q = 1,0 \times (1400,9 / 0,47 / 3) = 993,5 \text{ N/m}$$

La couvertine renvoie les efforts aux extrémités de la patte (Efforts F1 et F2).

Le moment fléchissant dans la couvertine au droit des vis gauches de fixation de la patte sur le support :

$$M = F1 \times L = \frac{993,5 \times 0,47}{2} \times 0,185 = 43,2 \text{ N.m}$$

Épaisseur d'une patte : 2 mm

Largeur d'une patte : $b = 100 \text{ mm}$

La contrainte normale dans la section au droit des vis gauches :

$$\sigma = \frac{M \times v}{I} = \frac{M \times t / 2}{\frac{bt^3}{12}} = \frac{6 \times M}{bt^2} = \frac{6 \times 43,2 \times 1000}{1000 \times (2 - 0,04)^2} = 674,7 \text{ MPa}$$

6.2.2 CALCUL LINÉAIRE (AUTO-CONTROL)

Comme pour la couvertine non ventilée, un calcul élastique linéaire a également été effectué en considérant le poids propre (G) et la charge due au vent (W_k).

Selon les résultats du calcul numérique, la résultante des réactions verticales aux appuis de fixations des pattes sur le support est : $R_{z,tot} = 1389,9 \text{ N}$

La résultante des réactions est comparable à la somme totale des charges obtenues par un calcul manuel (1400,9 N).

Les efforts dans chacune des vis de fixation de la couvertine sur les pattes (côté toiture) :

Effort tranchant : $V = 227,3 \text{ N}$

Effort axial (arrachement) : $N = 8 \text{ N}$

Les efforts d'arrachement dans les vis de fixation d'une patte sur le support :

Vis gauches (côté façade) : $N_g = 1473,8 \text{ N}$

Vis droites (côté toiture) : $N_d = 1437,6 \text{ N}$

Selon le calcul numérique, la contrainte dans la section au droit des vis gauches est de 652,1 MPa (voir Figure 17).

Elle est comparable à celle obtenue par calcul manuel (674,7 MPa).

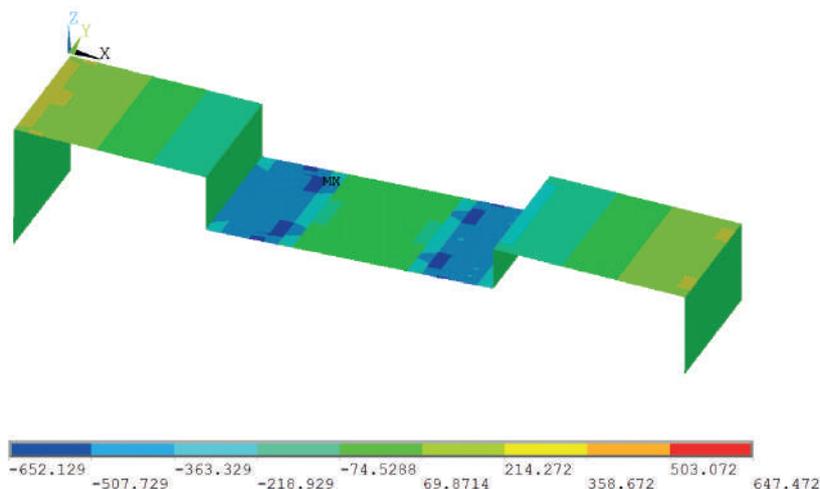


FIGURE 17 Contrainte normale (suivant l'axe X) dans une patte (en MPa)

6.2.3 CALCUL NON-LINÉAIRE

Les résultats du calcul non-linéaire sont donnés ci-dessous :

La résultante des réactions verticales : $R_{z,tot} = 1302,1 N$

Les efforts dans chacune des vis de fixation des pattes sur le support sont :

Vis gauches : $N_g = 1326,4 N$

Vis droites : $N_d = 1027,5 N$

Les efforts dans chacune des vis de fixation de la couverture sur les pattes sont :

Effort tranchant : $V = 243,6 N$

Effort axial (arrachement) : $N = 708,5 N$

Le Tableau 2 donne les efforts tranchants et d'arrachement aux niveaux des vis de fixation de la couverture sur les pattes, obtenus par calcul linéaire et non-linéaire.

Dans les pattes, la plastification commence au niveau des fixations sur le support pour une charge de $0,557 \times W_k$ (voir Figure 18). Pour $0,644 \times W_k$, toute la largeur de la patte s'est plastifiée. Pour $0,813 \times W_k$, toute la largeur de la patte au niveau du pli entre la semelle supérieure et l'âme verticale gauche s'est plastifiée. Il y a donc **une redistribution des efforts**, d'où la différence des résultats par rapport au calcul linéaire (voir Tableau 2).

| | Calcul linéaire | Calcul non-linéaire |
|--------------------------|-----------------|---------------------|
| Effort tranchant (V) | 227,3 N | 243,6 N |
| Effort d'arrachement (N) | 8 N | 708,5 N |

TABLEAU 2 Efforts dans les vis de fixation de la couverture sur les pattes, obtenus par un calcul linéaire et un calcul non-linéaire

En se référant à la NF EN 1993-1-3 Tableau 8.2, les résistances suivantes sont calculées :

La résistance au poinçonnement pour la fixation travaillant en traction :

$$F_{p,Rk} = 1496,3 N$$

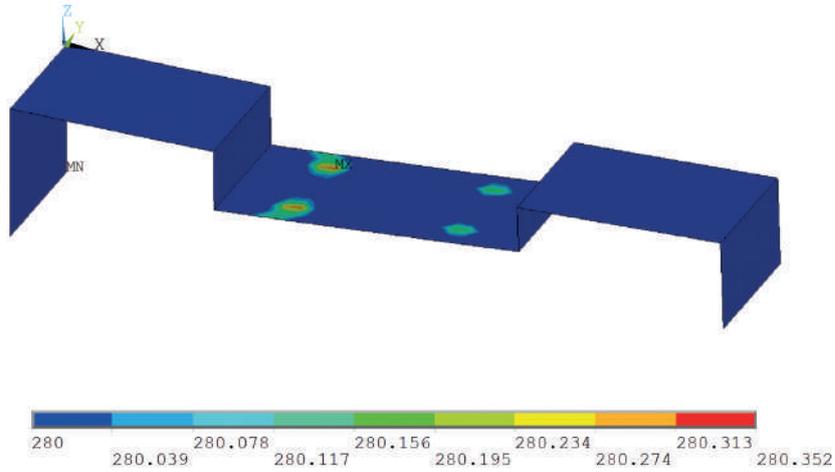
La résistance à l'arrachement pour la fixation travaillant en traction :

$$F_{o,Rk} = 1782 N$$

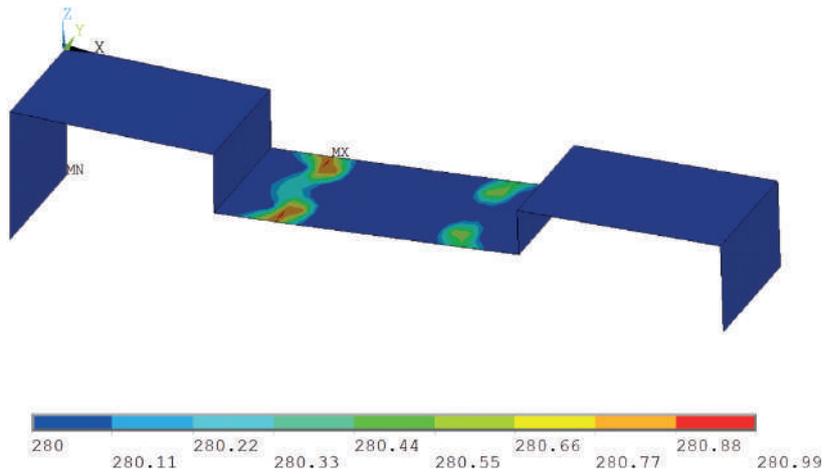
La résistance à la pression diamétrale pour la fixation travaillant au cisaillement :

$$F_{d,Rk} = 3084 N$$

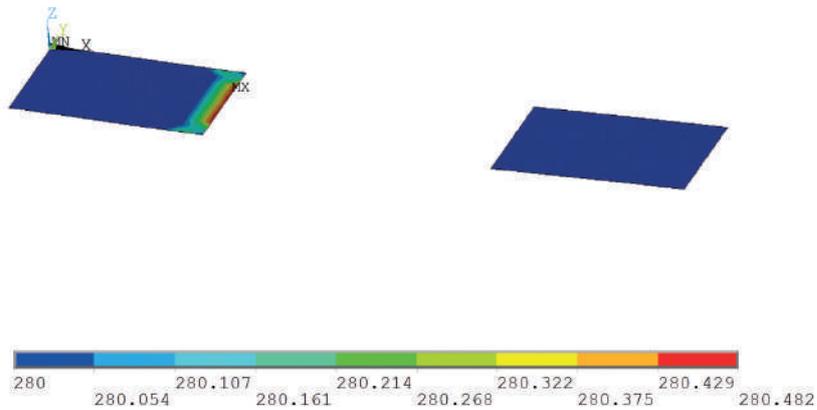
La résistance à la pression diamétrale, la résistance à l'arrachement, ainsi que la résistance au poinçonnement sont satisfaisantes car tous les efforts sont inférieurs aux valeurs de la résistance.



Contraintes plastiques équivalentes dans une patte pour une charge de $0,557xW_k$ (en MPa)



Contraintes plastiques équivalentes dans une patte pour une charge de $0,644xW_k$ (en MPa)



Contraintes plastiques équivalentes dans une patte pour une charge de $0,813xW_k$ (en MPa)

FIGURE 18 Contraintes plastiques équivalentes dans une patte pour différentes charges de vent

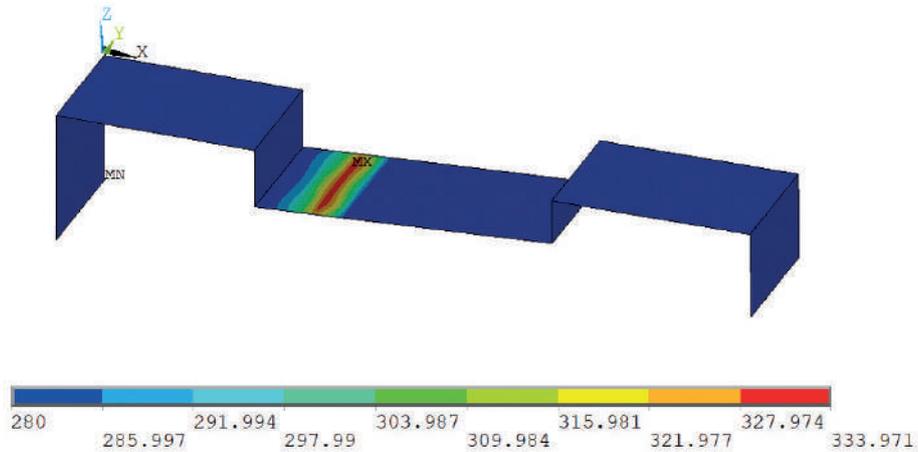


FIGURE 19 Contraintes plastiques équivalentes dans une patte pour une charge de $1 \times W_k$

6.2.4 COMPARAISON DES RÉSULTATS DU CALCUL NON-LINÉAIRE ET DES ESSAIS À LA RUINE

Comme pour la couvertine non ventilée, les résultats des simulations numériques ne sont pas tout à fait comparables aux résultats des essais à la ruine, puisque l'hypothèse d'une charge uniforme du vent est utilisée dans les simulations numériques (avec les coefficients de pression maximaux relevés lors de la première campagne d'essais) et non une charge réelle (répartition non uniforme) en tout point de la couvertine (voir Figure 20).

Les essais à la ruine ont été stoppés à une vitesse du vent de 142 km/h. La pression dynamique correspondante est de 930 Pa. Pour cette vitesse, une déformation importante de la couvertine a été constatée pour l'aile avec un entraxe des pattes de 1000 mm.

La Figure 21 donne la contrainte plastique autour d'une fixation de la couvertine sur la cornière ainsi qu'une photo prise à la fin de l'essai à la ruine.

La Figure 22 donne le déplacement de la couvertine en mm (environ 140 mm) pour un entraxe des pattes de 1000 mm. La déformation maximale observée lors de l'essai à la ruine est d'environ 120 mm. Cette déformation importante est due à la plastification de la patte la plus proche de l'angle (voir Figure 23).

Pour un entraxe des pattes de 500 mm, le déplacement de la couvertine est d'environ 21 mm. La déformation maximale observée lors de l'essai à la ruine est d'environ 10 à 15 mm.

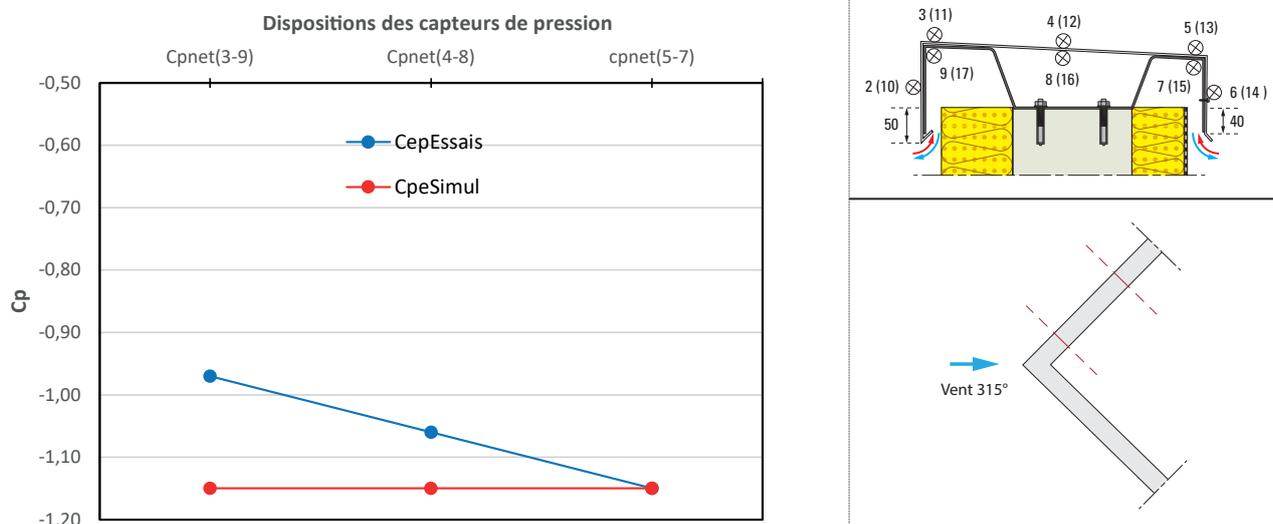
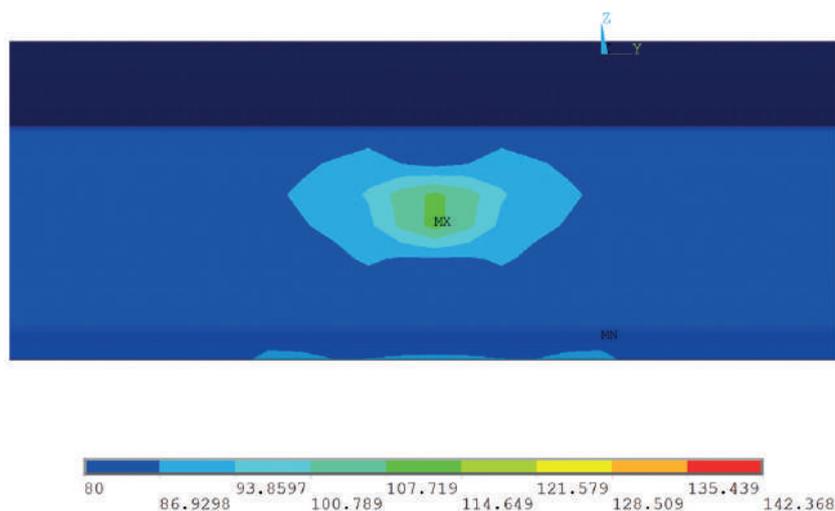


FIGURE 20 Coefficients de pression c_{pnet} résultants des essais (en bleue) ainsi que le coefficient de pression utilisé dans les simulations (en rouge)



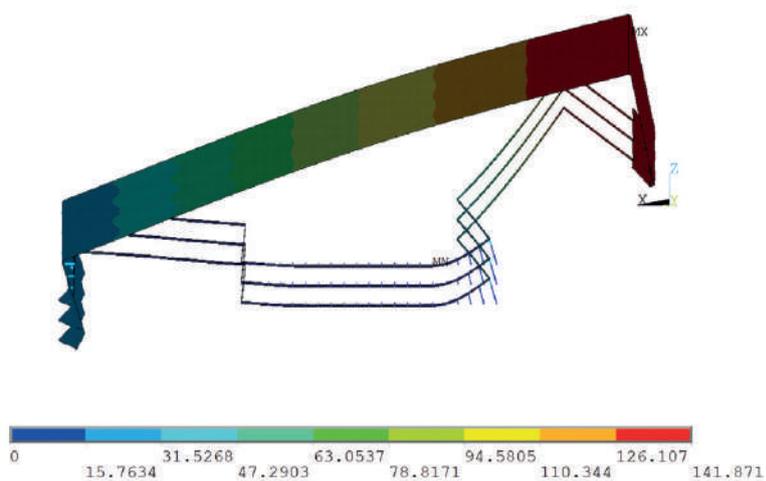
Simulations - contraintes plastiques (en MPa)



Essai à la ruine :
Légère plastification de la couverture
autour d'une fixation

FIGURE 21 Contraintes plastiques équivalentes dans la couverture (zone autour d'une fixation sur une patte)

Entraxe des pattes = 1000 mm

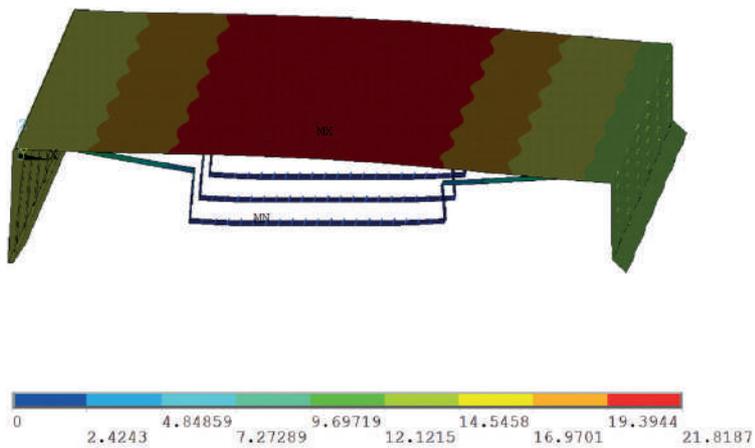


Simulations - Déplacement maximal de la couverture (environ 142 mm)



Essai à la ruine :
Déformation importante (environ 120 mm)
suite à la plastification de la patte la plus proche
de l'angle

Entraxe des pattes = 500 mm



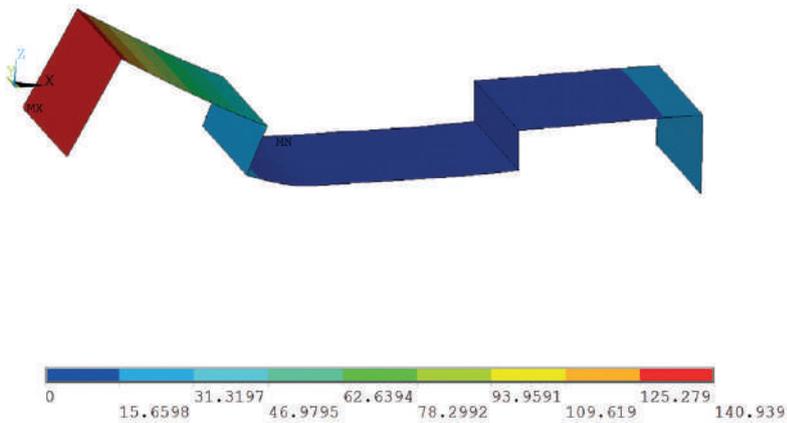
Simulations – Déplacement de la couverture (environ 22 mm)



Essai à la ruine :
Légères vibrations dont l'amplitude se situe
entre 10 et 15 mm

FIGURE 22 Déplacement de la couverture (en mm) et amplitude maximale de vibrations observée lors de l'essais

Entraxe des pattes = 1000 mm

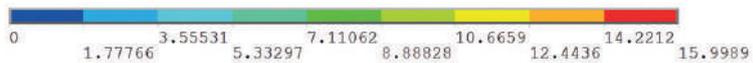
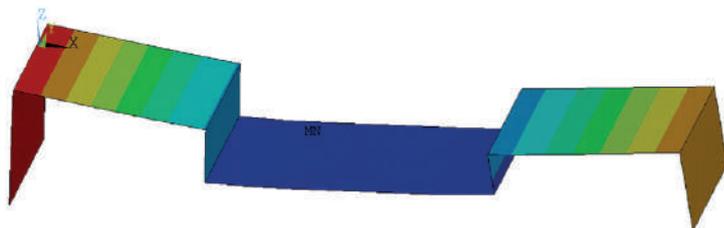


Simulations – Déplacement de la patte la plus proche de l'angle (en mm)



Essai à la ruine :
Plastification et déformation importante
de la patte la plus proche de l'angle au niveau
des vis de fixation sur le support côté façade

Entraxe des pattes = 500 mm



Simulations – Déplacement de la patte la plus proche de l'angle (en mm)



Essai à la ruine :
Légère déformation de la patte la plus proche de l'angle au niveau des vis de fixation sur le support côté façade

FIGURE 23 Déplacement de la patte la plus proche de l'angle (en mm) et amplitude maximale observée lors de l'essais

7

CONCLUSION

Dans ce rapport, nous avons présenté les résultats des essais à la ruine ainsi que les calculs numériques pour deux configurations de couvertines (non ventilée et ventilée). L'objectif étant de valider les modèles numériques de dimensionnement qui ont servis pour alimenter le rapport PROFEEL « Dimensionnement des couvertines - Octobre 2021 ».

Le dimensionnement des couvertines est effectué par calcul non-linéaire. Néanmoins, un calcul manuel et un calcul linéaire ont été effectués, en amont, pour vérifier et valider les modèles numériques. Les résultats du calcul

non-linéaire ont ensuite été comparés aux résultats des essais à la ruine.

Pour les deux configurations de couvertines, les modèles numériques développés reproduisent assez bien le comportement réel observé lors des essais à la ruine. Une légère différence est néanmoins observée, due essentiellement à la prise en compte d'une charge uniforme du vent dans les simulations numériques comparée à une charge réelle plutôt non uniforme. La charge prise en compte dans les simulations est ainsi légèrement supérieure à la charge réelle, ce qui place les calculs plutôt du « côté sécurité ».

TABLE DES MATIÈRES

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUCTION | 4 |
| 2 | DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE | 5 |
| 2.1 | Références normatives | 5 |
| 2.2 | Autres documents | 5 |
| 3 | ESSAIS À LA RUINE | 6 |
| 3.1 | Description | 6 |
| 3.2 | Caractéristiques des maquettes | 7 |
| 3.2.1 | Configuration 1 : Couvertine non ventilée | 7 |
| 3.2.2 | Configuration 2 : Couvertine ventilée | 7 |
| 4 | CHARGES APPLIQUÉES SUR UNE COUVERTINE | 9 |
| 4.1 | Notations | 9 |
| 4.2 | Charge de vent | 9 |
| 4.2.1 | Pression dynamique de pointe | 9 |
| 4.2.2 | Coefficients de pression | 9 |
| 5 | MODÉLISATION DES COUVERTINES | 10 |
| 6 | RÉSULTATS DES CALCULS ET DES ESSAIS | 12 |
| 6.1 | Couvertine non ventilée | 12 |
| 6.1.1 | Calcul manuel (auto-control) | 12 |
| 6.1.2 | Calcul linéaire (auto-control) | 13 |
| 6.1.3 | Calcul non-linéaire | 13 |
| 6.1.4 | Comparaison des résultats du calcul non-linéaire et des essais à la ruine | 15 |
| 6.2 | Couvertine ventilée | 16 |
| 6.2.1 | Calcul manuel (auto-control) | 17 |
| 6.2.2 | Calcul linéaire (auto-control) | 17 |
| 6.2.3 | Calcul non-linéaire | 18 |
| 6.2.4 | Comparaison des résultats du calcul non-linéaire et des essais à la ruine | 20 |
| 7 | CONCLUSION | 24 |

RÉSUMÉ

Le rapport « Dimensionnement des couvertines – Essais & modélisation », présente les résultats des essais en soufflerie ainsi que les calculs numériques pour deux configurations de couvertines (non ventilée et ventilée). L'objectif étant de valider les modèles numériques de dimensionnement qui ont servis pour alimenter le rapport PROFEEL « Dimensionnement des couvertines – Octobre 2021 ».