



INSTITUT  
TECHNOLOGIQUE

# Compléments au Guide COBEI

Essais de sorption / désorption des  
assemblages et des bois de bout

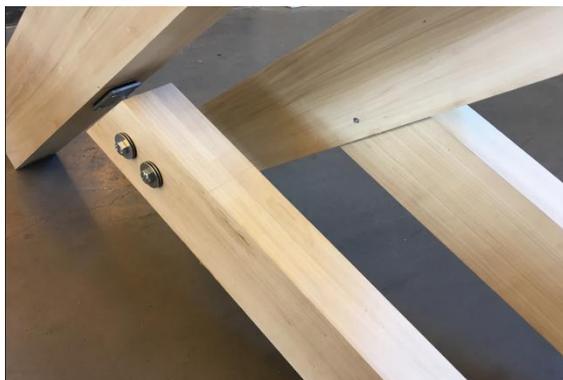
Projection dans le dimensionnement

N° de convention FBF : 22 / RD / 1571

Rapport final

Date : 09/05/2023

Rédaction : mathieu Lambert – FCBA



Avec le soutien de



INTERPROFESSION  
NATIONALE

**CODIFAB**  
Développement des Industries Françaises  
de l'Ameublement et du Bois

# Sommaire

|   |   |           |
|---|---|-----------|
| 1   | Contexte et objectifs de l'étude .....  | 3         |
| 2   | Méthodologie .....  | 3         |
| <b>Cinétique de sorption/désorption des assemblages et des bois de bout .....</b> |   | <b>4</b>  |
| 3   | Généralités de cette partie de l'étude .....                                  | 5         |
| 4   | Préambule : méthode expérimentale et robustesse des mesures.....              | 7         |
| 5   | Essais sur les assemblages.....   | 8         |
| 5.1   | Assemblage arbalétrier / contrefiche .....                                    | 8         |
| 5.1.1   | Détails des assemblages et des points de mesures .....                        | 8         |
| 5.1.2   | Résultats des mesures d'humidité en continu .....                             | 9         |
| 5.1.3   | Résultats des mesures complémentaires .....                                   | 10        |
| 5.1.4   | Synthèse et conclusion pour l'assemblage Arbalétrier / Contrefiche .....      | 13        |
| 5.2   | Assemblage poteau / poutres.....  | 14        |
| 5.2.1   | Détails des assemblages et des points de mesures .....                        | 14        |
| 5.2.2   | Résultats des mesures d'humidité en continu .....                             | 15        |
| 5.2.3   | Résultats des mesures complémentaires .....                                   | 16        |
| 5.2.4   | Synthèse et conclusion pour l'assemblage Poteau / Poutres .....               | 20        |
| 5.3   | Faces en bois de bout .....   | 20        |
| 5.3.1   | Détails des éléments et des points de mesures .....                           | 20        |
| 5.3.2   | Résultats des mesures d'humidité en continu .....                             | 21        |
| 5.3.3   | Résultats des mesures complémentaires .....                                   | 22        |
| 5.3.4   | Synthèse et conclusion pour les faces en bois de bout .....                   | 27        |
| 5.4   | Compléments d'informations et d'analyses sur les assemblages.....             | 28        |
| 5.4.1   | Constats visuels de l'évolution des assemblages .....                         | 28        |
| 5.4.2   | Derniers constats visuels sur assemblages avant démontage .....               | 29        |
| 5.4.3   | Constats après démontage des assemblages .....                                | 30        |
| 5.5   | Synthèse et conclusion des essais de cinétique de sorption / désorption ..... | 32        |
| <b>Projection dans le dimensionnement mécanique .....</b>                         |   | <b>34</b> |
| 6   | Généralités de cette partie de l'étude .....                                  | 35        |
| 7   | Hypothèses retenues .....   | 36        |
| 8   | Calculs effectués et résultats .....  | 39        |
| 8.1   | Introduction sur la démarche suivie.....                                      | 39        |
| 8.2   | Méthodologie de calcul suivie.....  | 39        |
| 8.3   | Préambule aux résultats – Synthèse des étapes 1 à 3.....                      | 40        |
| 8.4   | Résultats obtenus .....   | 42        |
| 8.5   | Analyse des résultats .....   | 46        |
| 9   | Conclusion de la projection dans le dimensionnement.....                      | 47        |

## 1 Contexte et objectifs de l'étude

Un projet soutenu par le CODIFAB et France Bois Forêt (Réf. FBF : 21/PT/1333 ; Réf. CODIFAB : 2020\_FCBA\_B\_12\_43) sur les années 2020 et 2021 a permis d'aboutir à la parution en Juin 2022 du guide de Conception des Ouvrages Bois Exposés aux Intempéries (guide COBEI)

Le guide COBEI constitue une première proposition d'évolutions de pratiques constructives concernant la conception des ouvrages extérieurs en bois, notamment au niveau des assemblages.

Les suites données au guide COBEI dans le cadre du présent projet ont pour objectif d'apporter deux compléments :

- Etudier expérimentalement la cinétique de sorption / désorption d'eau (reprise d'eau et assèchement) au droit de certains assemblages et également pour les faces en bois de bout
- Se projeter dans le dimensionnement des ouvrages exposés aux intempéries en prenant en compte l'affaiblissement mécanique (résistance et raideur) lié aux assemblages drainants, affaiblissement quantifié au cours du premier projet de rédaction du guide COBEI.

## 2 Méthodologie

Le projet et le présent rapport comportent ainsi deux phases bien distinctes, l'une expérimentale et l'autre théorique sur base de calculs de la Résistance des Matériaux.

Le développement de la partie expérimentale a été très consommateur de temps notamment du fait de la livraison des éléments bois pour constituer les éprouvettes, à l'état vert, qu'il a donc fallu sécher avant usinage, assemblage et instrumentation.

Les premiers essais, de calibrage ont ainsi démarré début Décembre 2022. Ils ont été poursuivis jusqu'à fin Janvier 2023.

La partie théorique de projection dans le dimensionnement a été réalisée en parallèle du lancement et de la réalisation de la partie expérimentale.

Ce projet a donné lieu à la tenue de 3 Comités de Pilotage, en visioconférence, le 14/03/2022, le 4/07/2022 et le 16/02/2023.

La partie expérimentale de l'étude de cinétique de sorption / désorption d'eau, a été réalisée en partenariat entre le Laboratoire Essais & Simulations de FCBA et l'Equipe Ingénierie de FCBA. L'ensemble des méthodologies et résultats de cette partie sont présentées de manière exhaustive dans le rapport N°403/22/0285-A1-v1 annexé au présent rapport.

La partie théorique de projection dans le dimensionnement d'un ouvrage avec prise en compte des performances amoindries des « assemblages drainants » a été réalisée par l'Equipe Ingénierie de FCBA. Les performances considérées sont issues de la campagne d'essais du projet « Guide COBEI » dont les méthodologies et résultats sont présentés de manière exhaustive dans le rapport du Laboratoire Essais & Simulations de FCBA N°403/21/0405/A-1-v1 (livrable du projet précédent).

# Cinétique de sorption/désorption des assemblages et des bois de bout

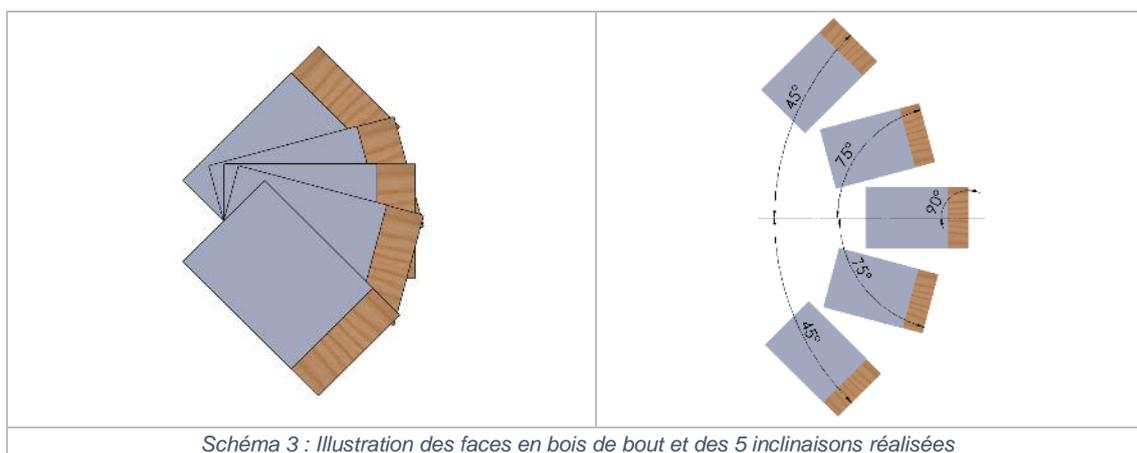
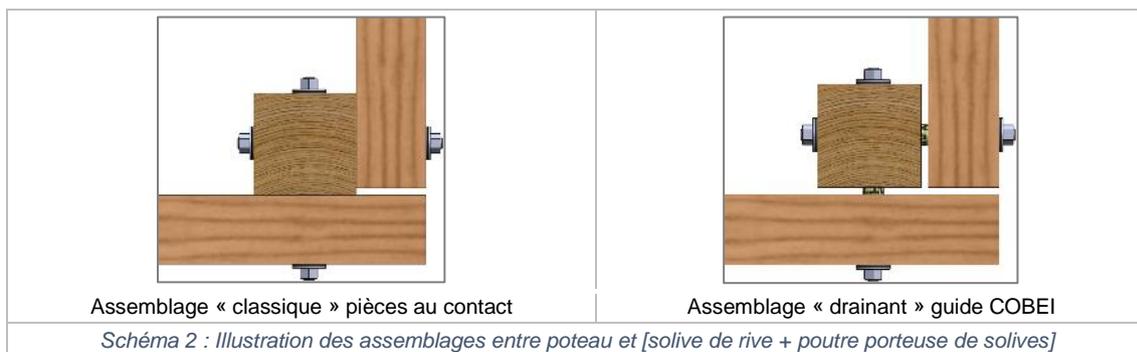
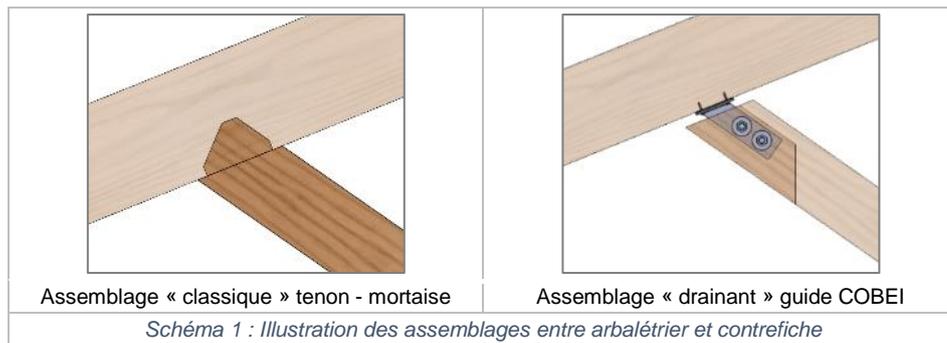


## 3 Généralités de cette partie de l'étude

La mise en place de la partie expérimentale concerne :

- deux assemblages spécifiques, réalisés de façon « classique » et de façon « drainante » telle que proposée dans le guide COBEI ;
- des faces en bois de bout positionnées à différentes inclinaisons.

Ces éléments sont résumés par les schémas ci-dessous :



Les maquettes d'assemblages, illustrées par les Schémas 1 et 2, ont pour vocation d'étudier les différences éventuelles de comportement vis-à-vis de la reprise d'eau et du séchage, liées à la conception de l'assemblage et notamment à la mise en œuvre des rondelles spécifiques préconisées par le guide COBEI.

Les maquettes de faces en bois de bout, illustrées par le Schéma 3, ont pour vocation d'étudier le comportement de ces faces en fonction de l'angle de la face par rapport à l'horizontale (45°, 75°, 90°) et de l'orientation de cette face (vers le sol ou vers le ciel). L'objectif de cette partie est d'apporter des éléments pour la proposition d'affectation du niveau de salubrité de ces faces en bois de bout effectuée dans le cadre du guide COBEI.

Le tableau suivant illustre les préconisations spécifiques du guide COBEI réalisées pour les assemblages testés.

|  |   |
|--|---|
|  | <p><b>Assemblage structural bois / métal</b></p> <p><b>Plaque en âme</b></p> <p>Boulonnage</p> <p>Platine dans contrefiche</p> <p>Faces extérieures de l'assemblage, boulonnage avec <b>1 rondelle E</b> (Étanchéité) et <b>2 rondelles ressort</b> (« belleville ») prises entre <b>2 rondelles mécaniques</b> classiques.</p>   |
|  | <p><b>Assemblage structural bois / bois</b></p> <p><b>Vue éclatée</b></p> <p>Boulonnage</p> <p>Poutre sur poteau</p> <p>Faces intérieures de l'assemblage, mise en œuvre d'une <b>rondelle EE</b> (Espace + Étanchéité) au droit des perçages, rendue <b>solidaire de chaque élément bois par vissage</b>.</p> <p>Faces extérieures de l'assemblage, boulonnage avec <b>1 rondelle E</b> (Étanchéité) et <b>4 rondelles ressort</b> (« belleville ») prises entre <b>2 rondelles mécaniques</b> classiques.</p> |

Tableau 1 : Synthèse graphique des principes d'assemblages drainants testés

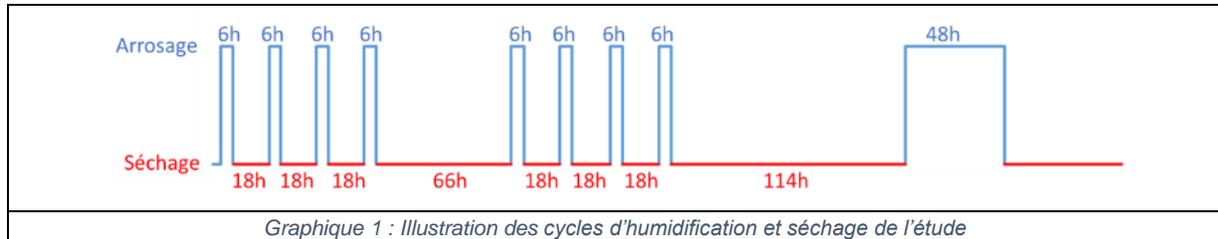
Le Tableau 2 illustre les produits mis en œuvre.

|  |   |  |
|--|---|--|
|  |   |  |
| <p>Bois / métal : plaque en âme (2 rondelles ressort + 1 rondelle E + 2 rondelles métal)</p> | <p>Bois / bois (4 rondelles ressort + 1 rondelle E + 2 rondelles métal)</p> | <p>Rondelle EE / Interface Bois/bois</p> |

Tableau 2 : Photographies des différents produits pour les deux assemblages drainants testés

## 4 Préambule : méthode expérimentale et robustesse des mesures

Le principe essentiel de cette approche expérimentale est le suivi en continu de la teneur en humidité des différents éléments bois composant les assemblages, en divers endroits considérés stratégiques. Les assemblages sont soumis à des cycles d'humidification et de séchage dont le nombre et la durée sont illustrés sur le graphique ci-dessous.



Graphique 1 : Illustration des cycles d'humidification et séchage de l'étude

Le principe de mesure de l'humidité retenu est basé sur la méthode de la résistivité. Des sondes résistives sont insérées dans les éléments bois et reliées à un système d'acquisition des données. La description exacte du nombre et des positionnements des sondes est dans le rapport d'essais N°403/22/0285-A1-v1.

Le développement, la mise en place et la réalisation des mesures a montré certaines limites au regard des conditions d'humidification générées pendant la phase expérimentale. Ainsi, les mesures d'humidité en continu ont été complétées de mesures physiques, réalisées entre chaque phases, « humide » et « sèche » :

- Dimensions de la section transversales des différentes pièces (pied à coulisse)
- Mesure de l'humidité en « un point » de chaque pièce (humidimètre capacitif)

De plus, pour apporter des mesures de comparaison, deux séries de mesures d'humidité à l'humidimètre à pointes GANN ont été réalisées en différents points des éprouvettes à l'issue du dernier cycle d'arrosage de 48h. La première série de mesures a été faite 1h00 après arrêt de l'arrosage (considérées comme à l'état humide) et la seconde après 5 jours de séchage (considérées à l'état sec). Ces deux séries de mesures d'humidité ont en revanche été réalisées à des profondeurs différentes (au moyen de cales d'épaisseurs maîtrisées) afin de retirer le maximum d'informations.

Enfin, il faut également noter que des fentes importantes sont apparues et se sont développées au fur et à mesure des cycles d'humidification / séchage. Ce phénomène peut notamment engendrer des pertes de contact intime entre les sondes résistives et le bois occasionnant ainsi des défauts de mesures.

Les photographies ci-dessous illustrent quelques fentes constatées, essentiellement en bois de bout mais dont certaines débouchaient sur les autres faces.



Photo 1 + Photo 2 + Photo 3 : Illustration de certaines fentes apparues en cours de cycles

## 5 Essais sur les assemblages

### 5.1 Assemblage arbalétrier / contrefiche

#### 5.1.1 Détails des assemblages et des points de mesures

La conception « classique » en tenon – mortaise et la conception « drainante » associée, proposée par le guide COBEI, sont illustrées sur la Photo 4 suivante.

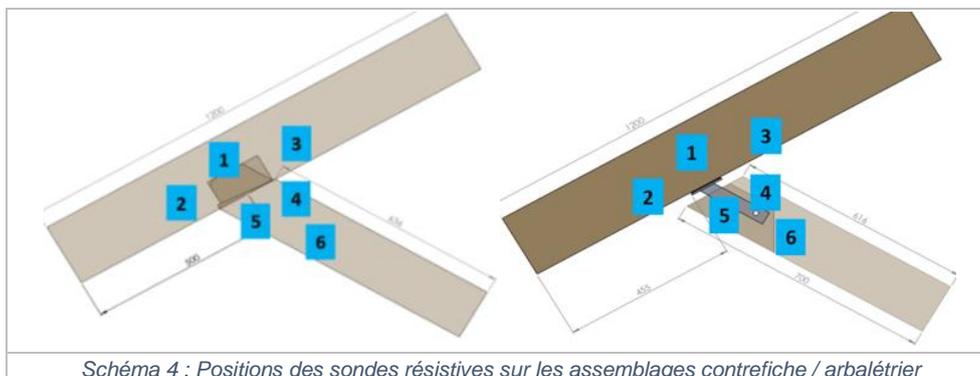


La Photo 5 ci-dessous illustre le principe de gestion de l'étanchéité du perçage pour passage de boulon avec mise en œuvre d'une rondelle d'étanchéité contre le bois (rondelle E) et de deux rondelles métalliques entre lesquelles deux rondelles ressort ou élastiques (rondelles « Belleville ») sont positionnées, pour gérer les phénomènes de retrait/gonflement.



La Photo 5 ci-dessus permet également d'apercevoir la platine métallique de liaison, en âme de la contrefiche avec deux boulons de fixation puis vissée, en partie haute, en appui contre la face de l'arbalétrier avec interposition d'une cale d'étanchéité en EPDM.

Le schéma ci-dessous illustre les 6 points de mesure de l'humidité en continu.



## 5.1.2 Résultats des mesures d'humidité en continu

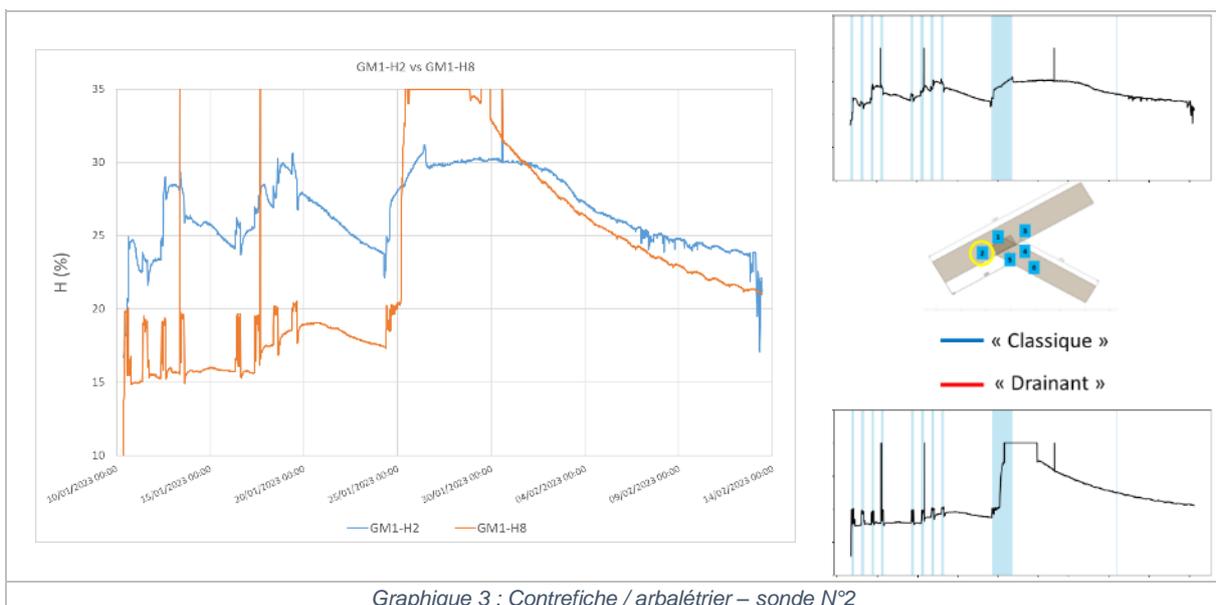
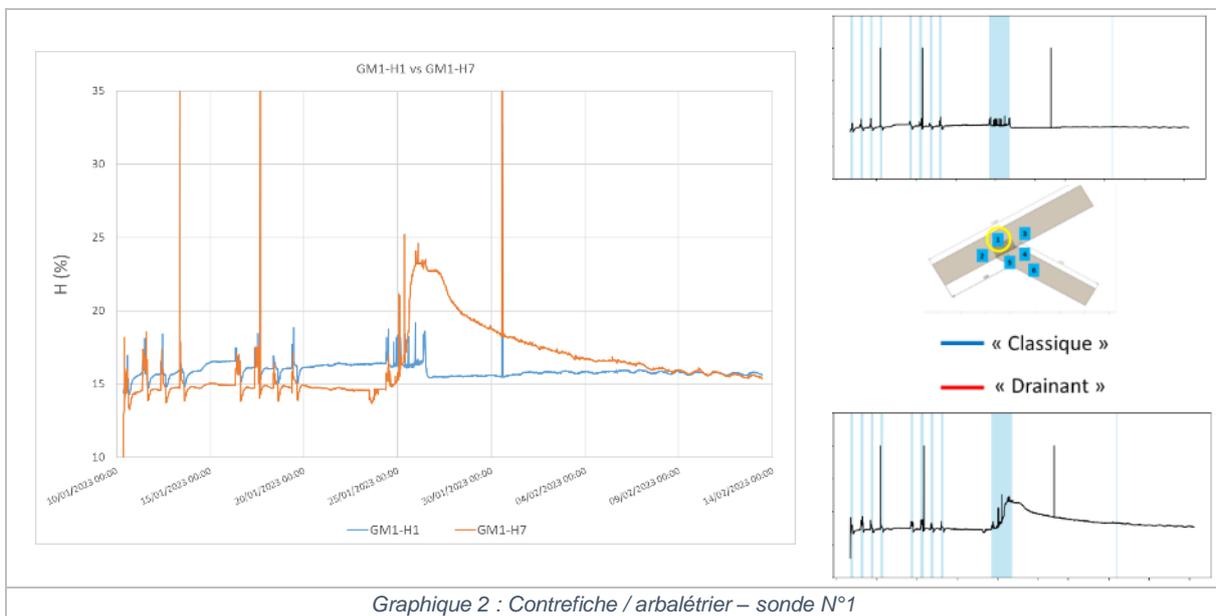
L'ensemble des résultats est présenté de manière exhaustive dans le rapport du Laboratoire Essais & Simulations.

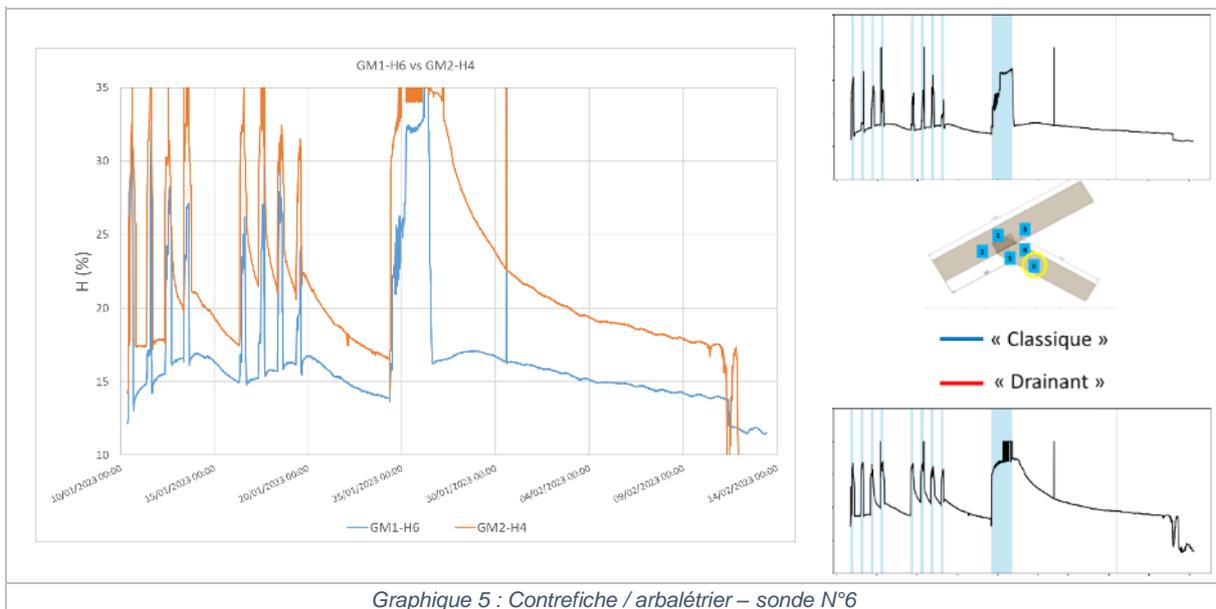
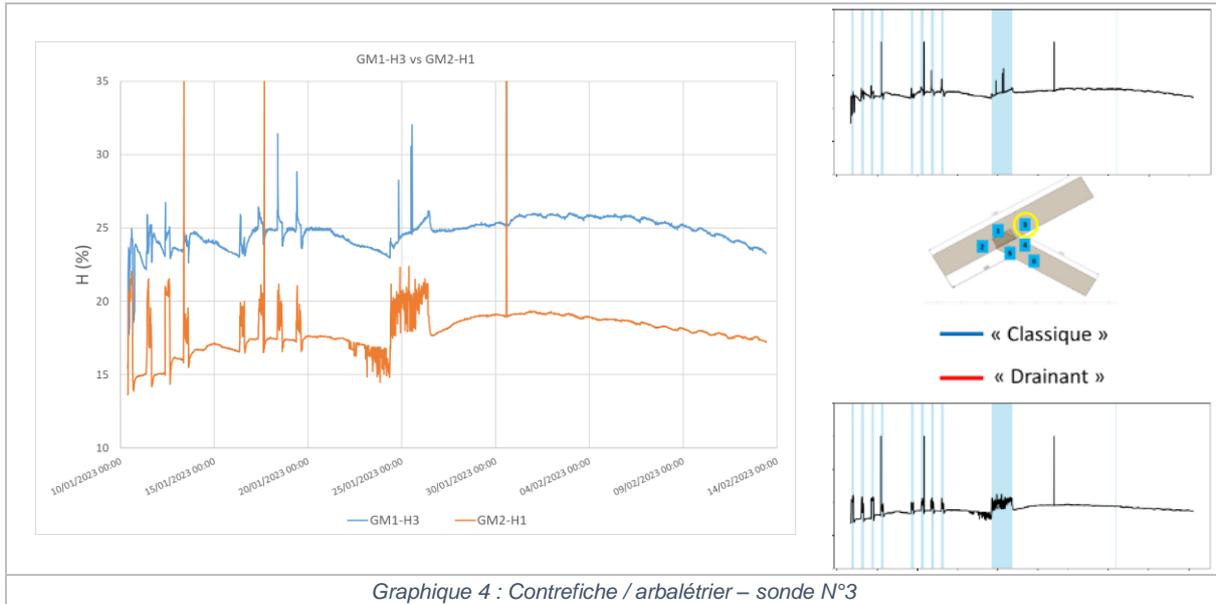
Comme évoqué dans le rapport d'essais, au regard de certains phénomènes erratiques constatés, notamment en phase d'arrosage, les mesures d'humidité en continu ne peuvent être considérées comme précises et justes, 100% fiables. Les mesures complémentaires effectuées sont à prendre en compte pour l'analyse globale.

Dans un premier temps, les mesures en continu sont synthétisées en cumulant sur un même graphique les résultats obtenus par les sondes situées à la même position (positions illustrées au Schéma 4) sur les deux assemblages (bleu = classique ; rouge = drainant).

La partie à droite du graphique illustre par des vignettes les signaux individuels avec l'affichage en bandes verticales bleu ciel des périodes d'arrosage (non représentées sur le graphique cumulé).

Certains graphiques n'ont pas été retenus pour ce rapport final, considérés non exploitables directement.





Les courbes présentées montrent des réactions marquées des sondes à l'arrosage et au séchage. Elles semblent montrer des tendances de cinétique de sorption/désorption d'eau au fil des cycles. Avant de les analyser directement, les mesures complémentaires effectuées sont présentées.

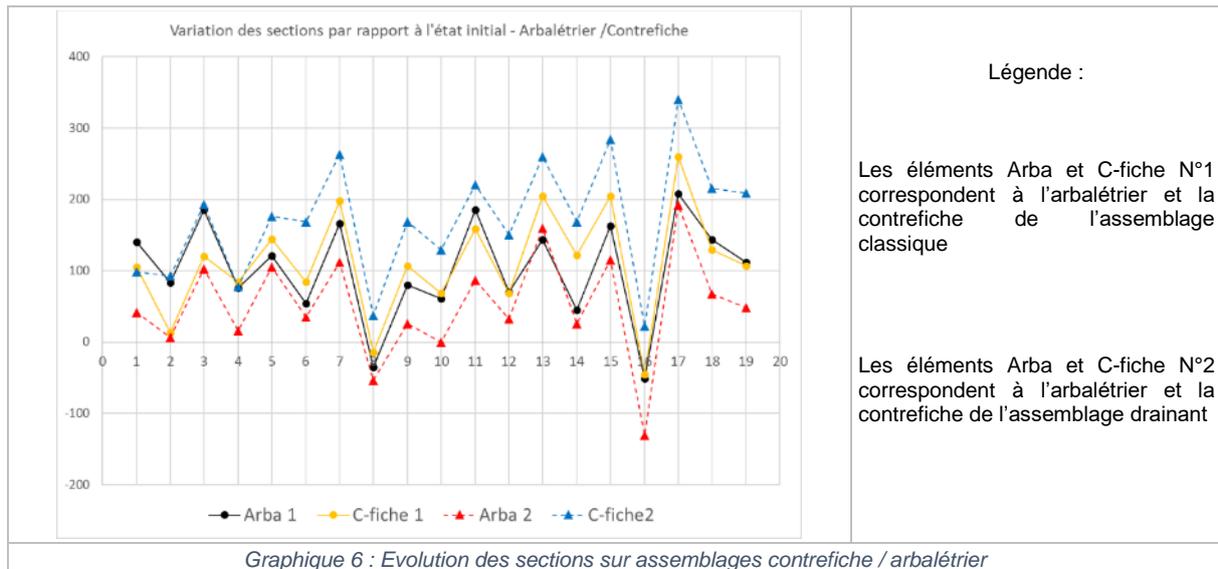
### 5.1.3 Résultats des mesures complémentaires

#### Mesures dimensionnelles :

Les deux dimensions des sections transversales de chaque élément ont été mesurées aux deux états « humide et sec ». L'état humide correspond à 1h00 après la fin de la phase d'arrosage, l'état sec correspond à 30 minutes avant le lancement de la phase d'arrosage suivante.

Les pièces équivalentes entre les assemblages « classiques et drainants » ne possèdent pas exactement le même débit, ainsi les mesures effectuées ne sont pas comparées en terme de dimensions linéaires (largeur et épaisseur) mais en terme de sections pour s'affranchir au mieux de cette différence de débit.

Le graphique suivant représente ainsi les évolutions calculées des sections, en se référant pour chaque calcul aux mesures effectuées à l'état initial.



Chaque point en abscisse représente un état humide ou sec, successivement. Les nombres **impairs** correspondent à un état **humide** et inversement. La seule exception est le point N°19 qui est également un état sec.

La mesure des dimensions au pied à coulisse est une mesure fiable. L'incertitude majeure dans le traitement et l'analyse de ces valeurs est essentiellement liée à l'apparition et au développement de fentes qui peuvent impacter les mesures réalisées, notamment à l'état sec.

Nous pouvons premièrement constater que le phénomène de retrait / gonflement est correctement mis en évidence sur l'évolution des sections. Une lecture directe tendrait à considérer le classement suivant des pièces de la plus humide à la moins humide :

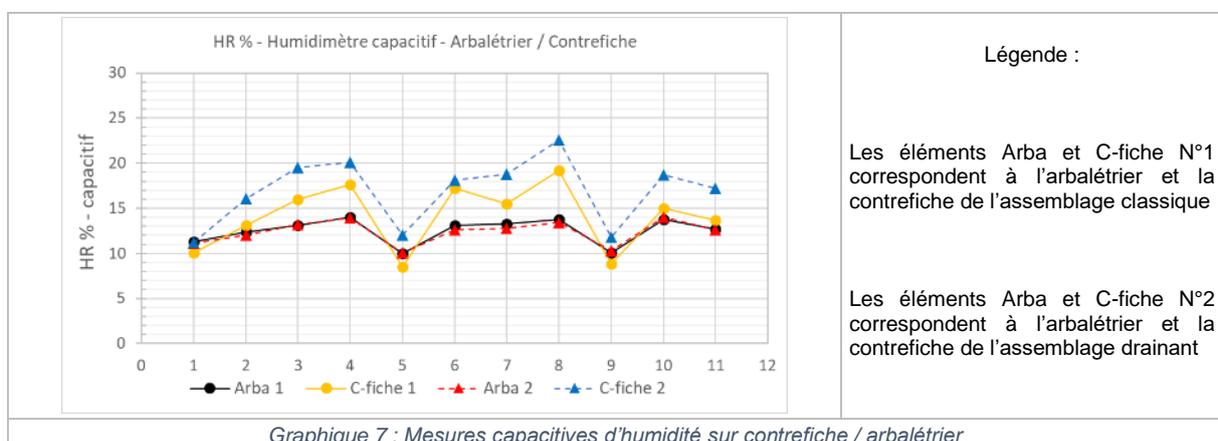
Contrefiche drainante > Arbalétrier classique = Contrefiche classique > Arbalétrier drainant

En revanche, l'amplitude constatée doit être considérée. Si l'on considère l'écart maximal de variation de section entre les deux contrefiches, il est de l'ordre de 100 mm<sup>2</sup> soit 0,9 % de la section initiale de la contrefiche (145 x 80 mm).

Ces mesures tendraient à montrer que les deux assemblages se comportent globalement de manière semblable d'un point de vue retrait/gonflement, sur les cycles effectués.

### Mesures d'humidité à l'humidimètre capacitif :

Le graphique suivant synthétise des mesures d'humidité réalisées sur une zone comparable de chaque pièce avec l'humidimètre capacitif uniquement à « l'état sec ».



Le graphique précédent est en cohérence avec les mesures de variations dimensionnelles.

Il apparaît, après chaque phase de séchage, que le classement suivant peut être fait, de la pièce la plus humide à la moins humide :

Contrefiche drainante > Contrefiche classique > Arbalétrier drainant = Arbalétrier classique

Nous pouvons cependant constater qu'après les deux premières « grandes phases » de séchage (66h puis 114h) représentées par les points N°5 et N°9, les 4 pièces conduisent à une mesure relativement proche, comprise entre 9% et 12%. Cela conduit à considérer comme précédemment que le comportement global est semblable.

Par ailleurs, on constate un comportement similaire sur les 4 pièces, à savoir une élévation de l'humidité sur les deux répétitions de cycles d'arrosage et séchage. En effet, l'humidité des deux contrefiches et des deux arbalétriers évoluent de façon relativement semblable, respectivement, entre les points N°1 et N°4 puis N°5 et N°8. Cela peut s'apparenter à un effet accumulation au fil des cycles, la durée de séchage de 18h n'étant apparemment pas suffisante pour désorber l'eau absorbée en 6h d'arrosage.

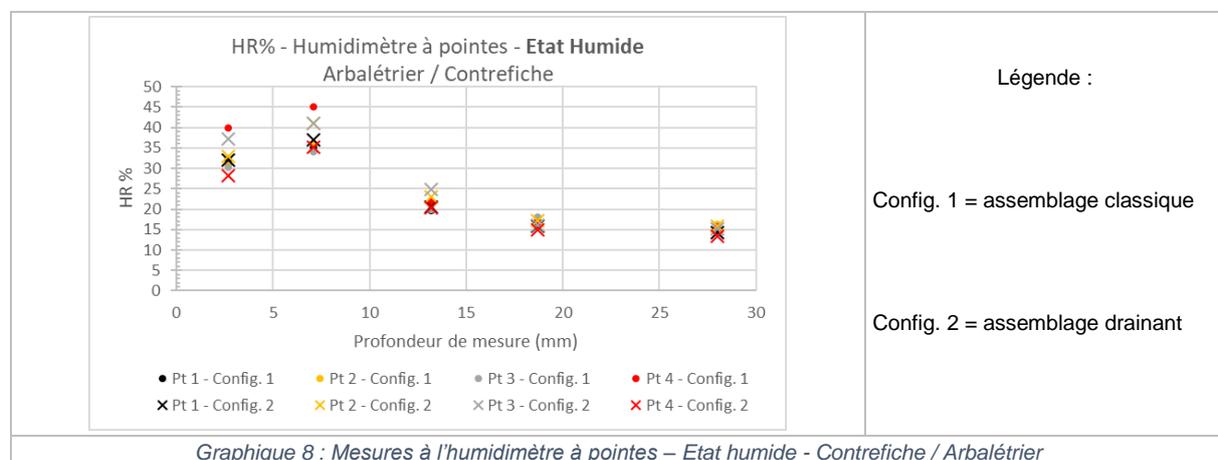
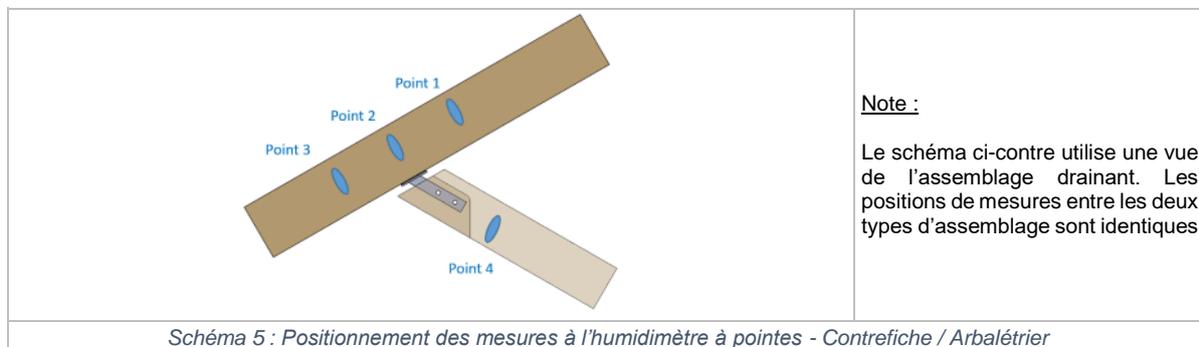
Les points N°10 et N°11 montrent en revanche que la Contrefiche drainante se démarque des 3 autres pièces. Ces points illustrent deux temps différents de séchage (naturel, non ventilé) après la plus grande phase d'arrosage de 48h. L'écart en humidité à l'endroit de mesure est de l'ordre de 4% entre les deux contrefiches. Il apparaît que l'arrosage plus important a conduit à une plus forte reprise en eau de la contrefiche drainante. Cela peut s'attribuer au fait d'avoir espacé les deux pièces ce qui expose le bois de bout de la contrefiche et également à la rainure pour mise en œuvre de la platine en âme. Néanmoins, le comportement en sorption/désorption est très similaire et l'écart entre les deux est de l'ordre de 4% maximum ce qui ne permet pas une différenciation nette de comportement.

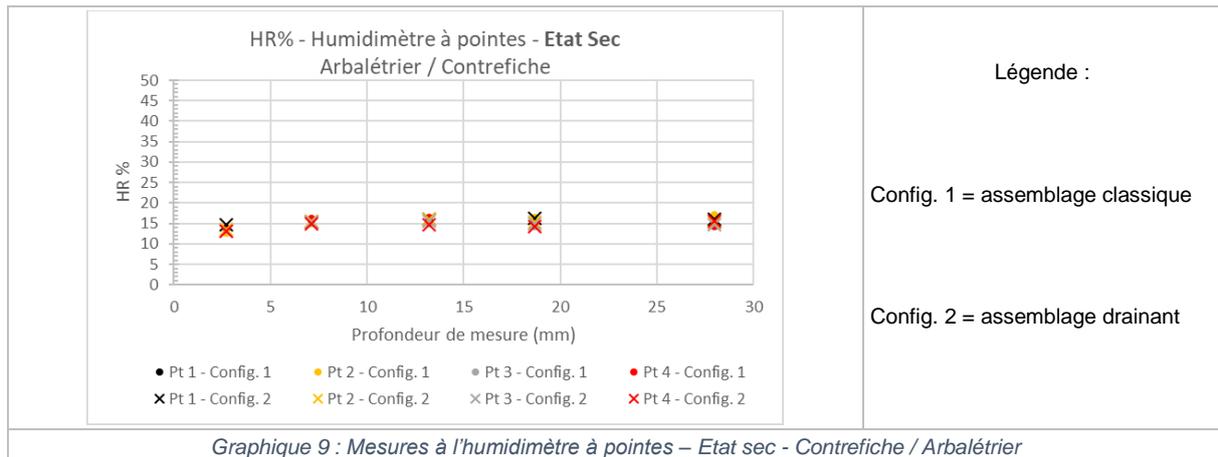
## Mesures d'humidité à l'humidimètre à pointes :

Les mesures réalisées à l'humidimètre à pointes sont synthétisées ci-dessous, avec :

- Un schéma de positionnement des mesures réalisées
- Un graphique des mesures effectuées à l'état humide, 1h00 après la grande phase d'arrosage de 48h
- Un graphique des mesures effectuées à l'état sec, 5 jours après l'arrêt de la phase d'arrosage de 48h

Il faut rappeler que cette phase « sèche » représente un séchage naturel, sans ventilation, à la différence des précédentes phases de séchage.





Les deux graphiques illustrent les humidités mesurées à 5 profondeurs différentes à partir de la surface (2,7 mm ; 7,1 mm ; 13,2 mm ; 18,7 mm et 28 mm). Nous avons ainsi un aperçu du gradient d'humidité sur une profondeur de l'ordre de 3 cm.

Ces mesures permettent premièrement de constater que les pièces semblent être stabilisées à cœur à une humidité de l'ordre de 15%. Il apparaît que le cycle d'arrosage de 48h a eu un effet sur une profondeur de l'ordre de 18 mm.

Il apparaît également que 1h00 après arrosage (⇔ état humide), la désorption a déjà un effet dans la mesure ou l'humidité constatée à 2,7 mm est inférieure à celle mesurée à 7,1 mm.

Les mesures obtenues ne permettent pas en revanche de dissocier les deux assemblages. Lorsque les points d'humidité sont les plus différents pour une même profondeur de mesure ce sont les valeurs à l'état humide, égales ou supérieures au point de saturation des fibres, gamme d'humidité dans laquelle les mesures ne sont pas différenciables avec certitude malgré un affichage différent.

Ces mesures corroborent les deux analyses précédentes, à savoir un comportement similaire entre les deux assemblages.

#### 5.1.4 Synthèse et conclusion pour l'assemblage Arbalétrier / Contrefiche

L'ensemble des résultats des mesures complémentaires aux mesures d'humidité en continu permet d'apporter des éclairages sur la lecture des courbes obtenues. Il est en revanche délicat de tirer des enseignements quantitatifs de l'ensemble de ces mesures, du point de vue de la teneur en humidité qui était un des objectifs de ces mesures.

Quelques tendances semblent néanmoins se dessiner à ce stade :

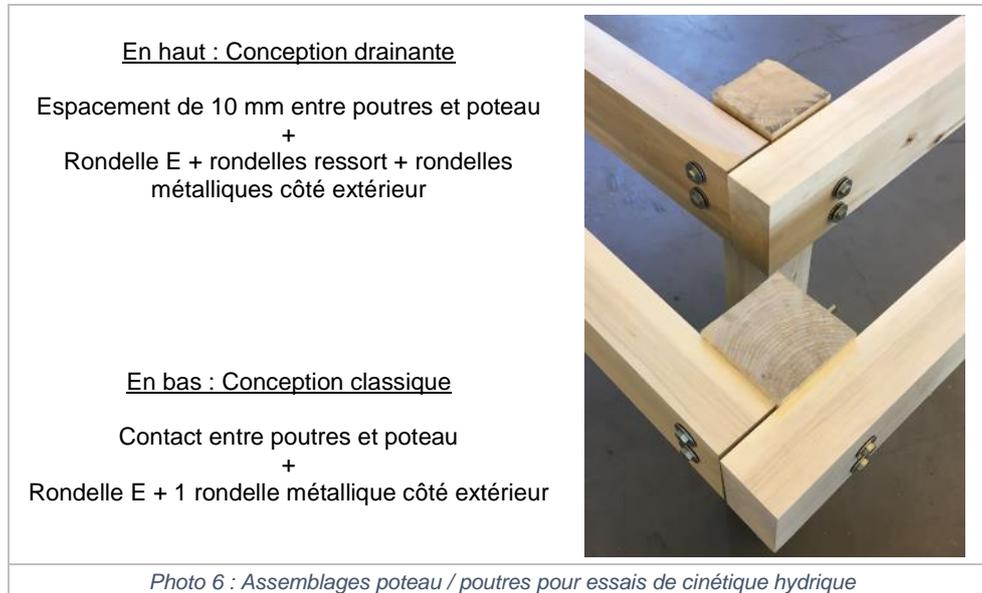
- La face en bois de bout de la contrefiche de l'assemblage drainant conduit apparemment à une reprise d'eau plus importante de la contrefiche. Parallèlement, l'assèchement semble favorisé.
- La zone massive de la contrefiche sous la rainure qui accueille la plaque en âme (Graphique 5) absorbe apparemment plus d'eau. La désorption apparaît néanmoins correcte et rapide.
- Il semble dans ce cas que les deux modifications majeures de conception pour la rendre drainante (espacement entre les pièces et rainurage pour plaque en âme) conduisent à une plus forte absorption d'eau des zones ainsi exposées. En revanche il apparaît que ces modifications jouent l'effet souhaité en période sèche avec une désorption favorisée.

Sans donnée de teneur en eau correctement quantifiée il est par contre impossible à ce stade de tirer des conclusions plus poussées et de se projeter plus à même dans la différence de durée de vie.

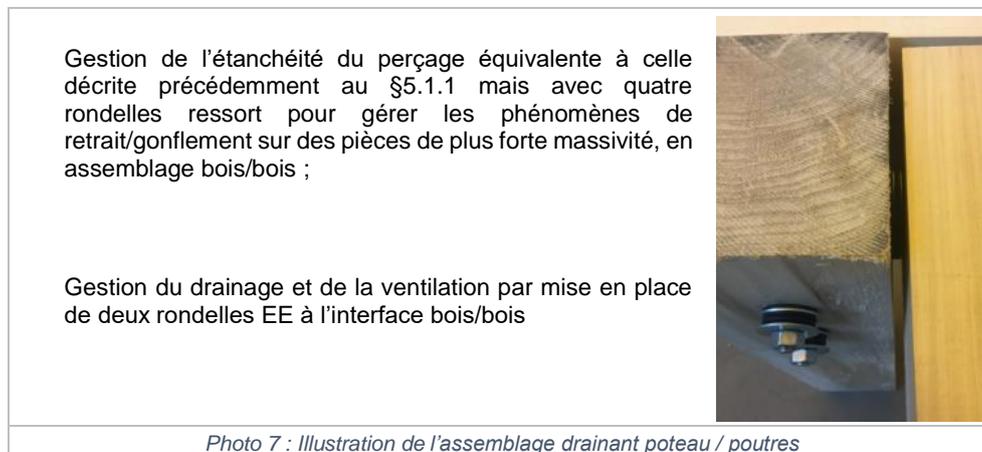
## 5.2 Assemblage poteau / poutres

### 5.2.1 Détails des assemblages et des points de mesures

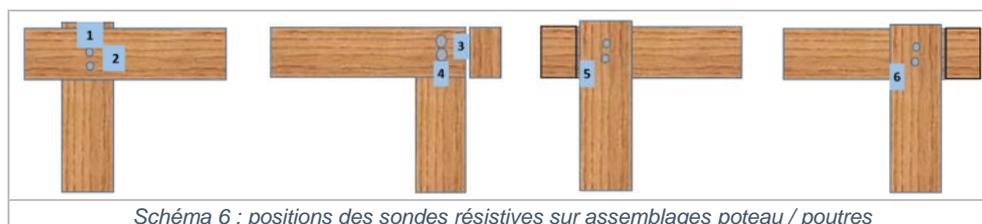
La conception « classique » et la conception « drainante » associée, proposée par le guide COBEI, sont illustrées sur la Photo 6 suivante.



La Photo 7 ci-dessous illustre le principe de cette conception :



Le schéma ci-dessous illustre les 6 points de mesure de l'humidité en continu, pour les deux assemblages.



## 5.2.2 Résultats des mesures d'humidité en continu

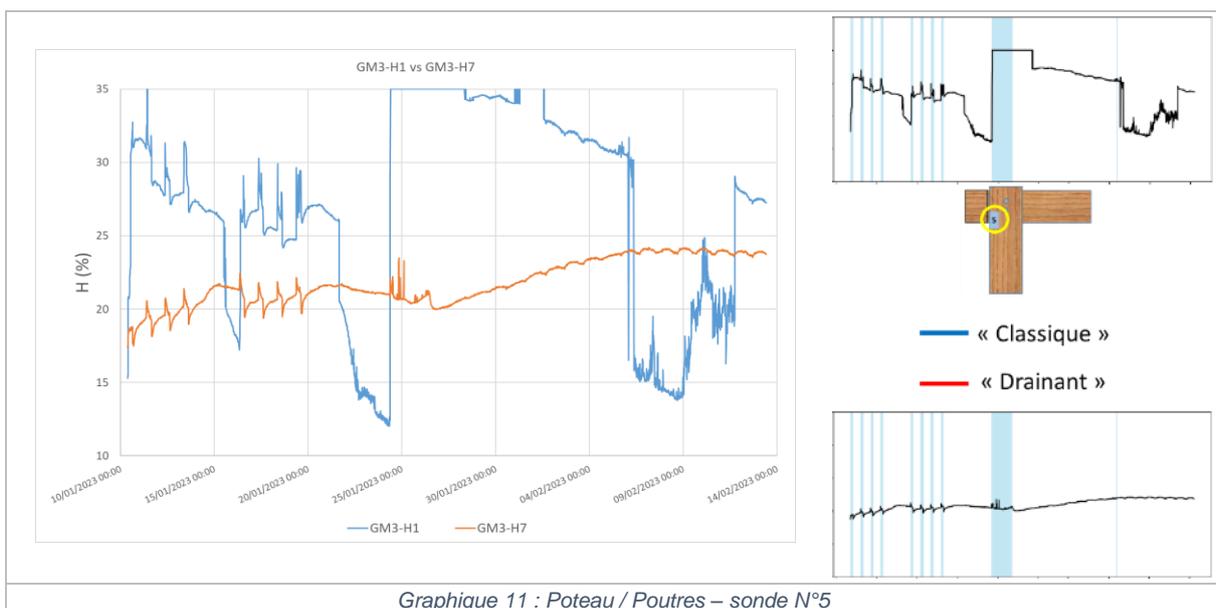
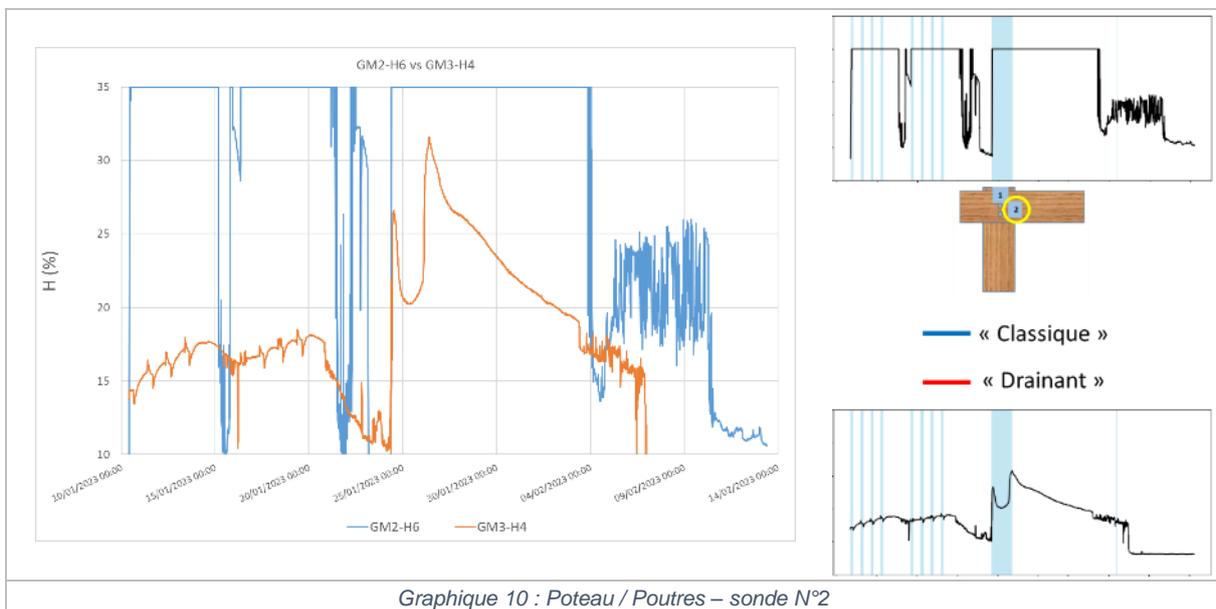
L'ensemble des résultats est présenté de manière exhaustive dans le rapport du Laboratoire Essais & Simulations.

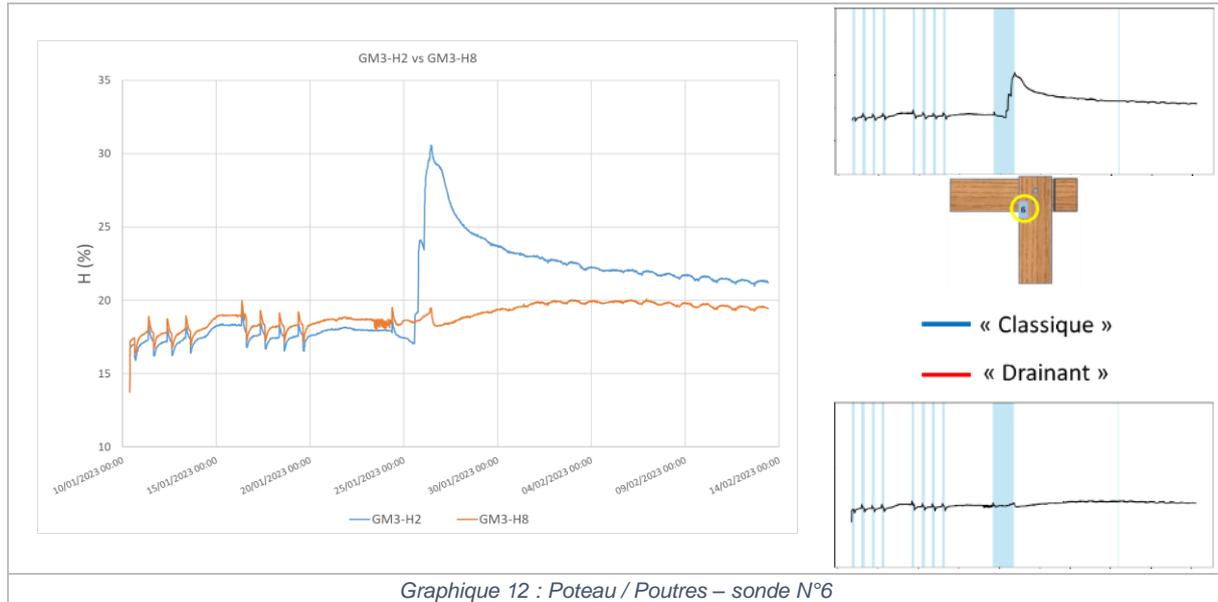
Comme évoqué dans le rapport d'essais, au regard de certains phénomènes erratiques constatés, notamment en phase d'arrosage, les mesures d'humidité en continu ne peuvent être considérées comme précises et justes, 100% fiables. Les mesures complémentaires effectuées sont à prendre en compte pour l'analyse globale.

Les mesures en continu sont synthétisées en cumulant sur un même graphique les résultats obtenus par les sondes situées à la même position (positions illustrées au schéma 1) sur les deux assemblages (bleu = classique ; rouge = drainant).

La partie à droite du graphique illustre par des vignettes les signaux individuels avec l'affichage en bandes verticales bleu ciel des périodes d'arrosage (non représentées sur le graphique cumulé).

Certains graphiques n'ont pas été retenus pour ce rapport final, considérés non exploitables directement.





Les courbes présentées montrent des réactions marquées des sondes à l'arrosage et au séchage. Elles semblent parfois montrer des tendances de cinétique de sorption/désorption d'eau au fil des cycles mais également des comportements erratiques (en saturation ou en brusque chute d'humidité). Avant de les analyser directement, les mesures complémentaires effectuées sont présentées.

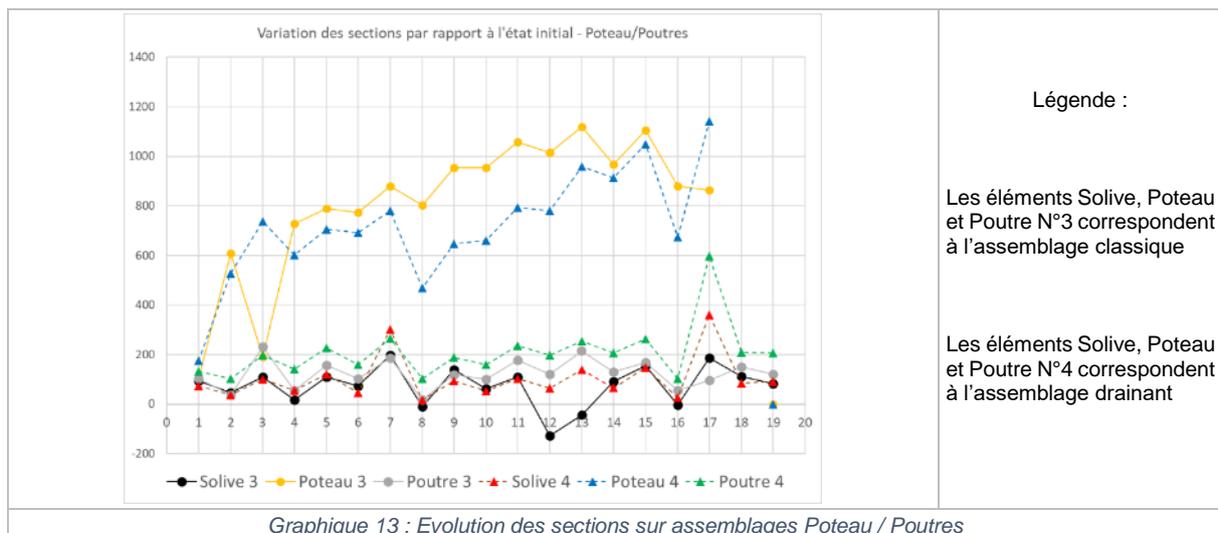
### 5.2.3 Résultats des mesures complémentaires

#### Mesures dimensionnelles :

Les deux dimensions des sections transversales de chaque élément ont été mesurées aux deux états « humide et sec ». L'état humide correspond à 1h00 après la fin de la phase d'arrosage, l'état sec correspond à 30 minutes avant le lancement de la phase d'arrosage suivante.

Les pièces équivalentes entre les assemblages « classiques et drainants » ne possèdent pas exactement le même débit, ainsi les mesures effectuées ne sont pas comparées en terme de dimensions linéaires (largeur et épaisseur) mais en terme de sections pour s'affranchir au mieux de cette différence de débit.

Le graphique suivant représente les évolutions calculées des sections, en se référant, pour chaque calcul, à l'état initial.



Chaque point en abscisse représente un état humide ou sec, successivement. Les nombres **impairs** correspondent à un état **humide** et inversement. La seule exception est le point N°19 qui est également un état sec.

Certains points peuvent ne pas être représentés, pour des raisons de mesures erronées.

La mesure des dimensions au pied à coulisse est une mesure fiable. L'incertitude majeure dans le traitement et l'analyse de ces valeurs est essentiellement liée à l'apparition et au développement de fentes qui peuvent impacter les mesures réalisées, notamment à l'état sec.

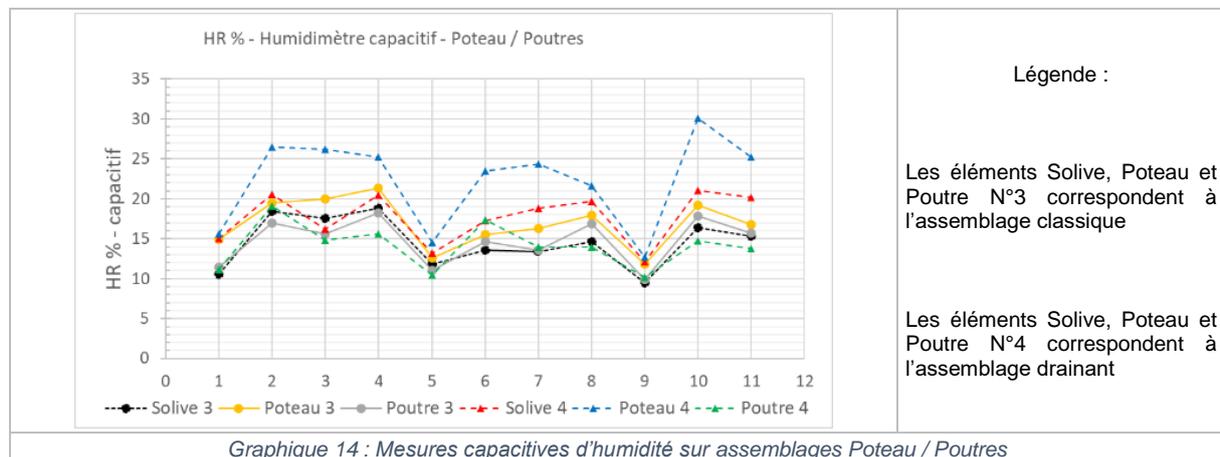
Nous pouvons premièrement constater que le phénomène de retrait / gonflement est mis en évidence sur l'évolution des sections. Une lecture directe tendrait à considérer que :

- La section des poutres oscille globalement autour d'une valeur moyenne, sans évolution particulière et donc sans reprise d'eau importante.
- Les deux poteaux montrent une évolution de section assez semblable, qui illustre une reprise d'eau cumulative au fil des cycles

Ces mesures, au premier abord, tendraient à montrer que les deux assemblages se comportent globalement de manière semblable d'un point de vue retrait/gonflement, sur les cycles effectués.

### Mesures d'humidité à l'humidimètre capacitif :

Le graphique suivant synthétise des mesures d'humidité réalisées sur une zone comparable de chaque pièce avec l'humidimètre capacitif uniquement à « l'état sec ».



Graphique 14 : Mesures capacitives d'humidité sur assemblages Poteau / Poutres

Excepté pour le poteau de la configuration drainante (Poteau 4) le graphique précédent est en cohérence avec les mesures de variations dimensionnelles.

En effet il apparaît que l'humidité mesurée du poteau 4 est systématiquement au-dessus de celle du poteau 3 (assemblage classique). Nous pouvons noter cependant que les deux états secs les « plus importants » (points N°5 et N°9), issus d'une période de séchage de 66 h et 114 h respectivement, conduisent à un écart maximal d'humidité entre pièces de l'ordre de 5%.

Il est également notable que la phase d'arrosage de 48 h a conduit à une humidité proche de 30% pour le Poteau 4 (point N°10). La désorption du Poteau 4 illustrée par la droite entre les points N°10 et N°11 apparaît comme plus rapide que celle des autres pièces.

La reprise en humidité plus importante du Poteau 4 est potentiellement à mettre en corrélation avec une fente en tête de poteau apparue très tôt dans la phase d'expérimentation.

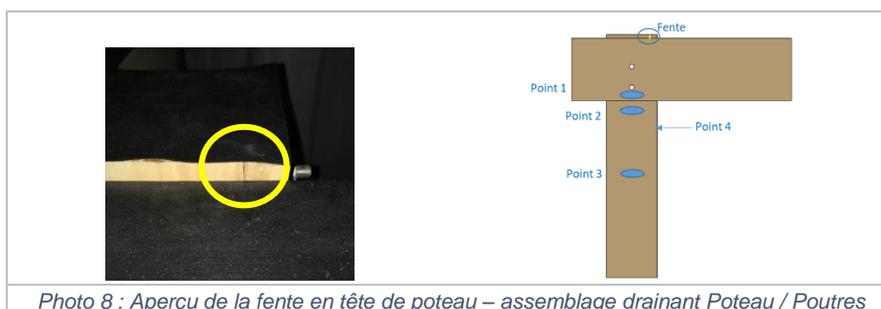


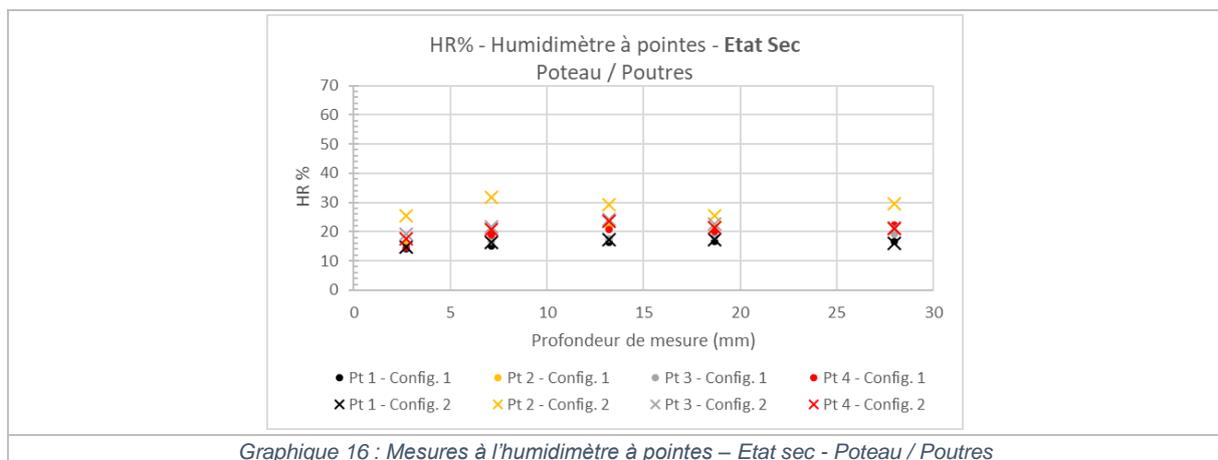
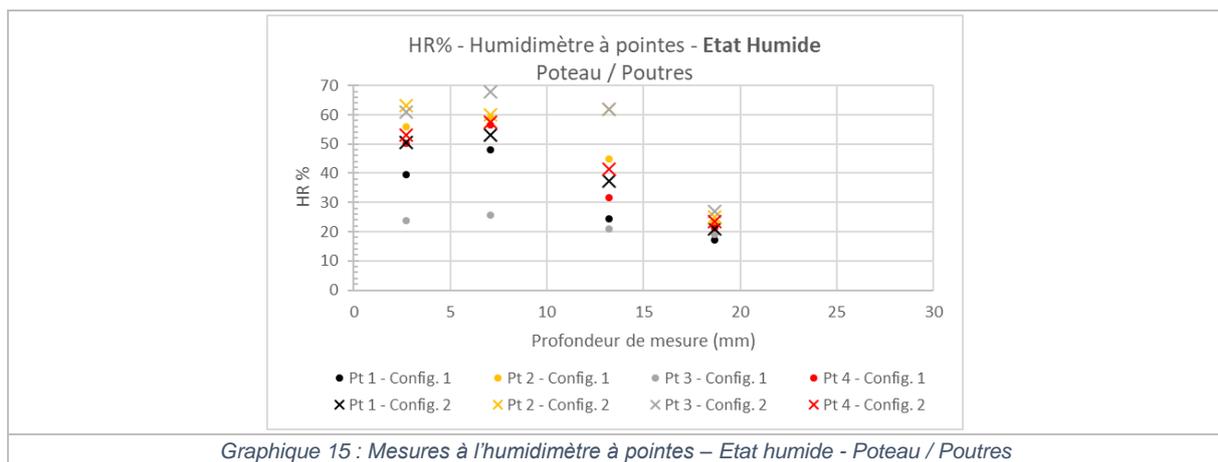
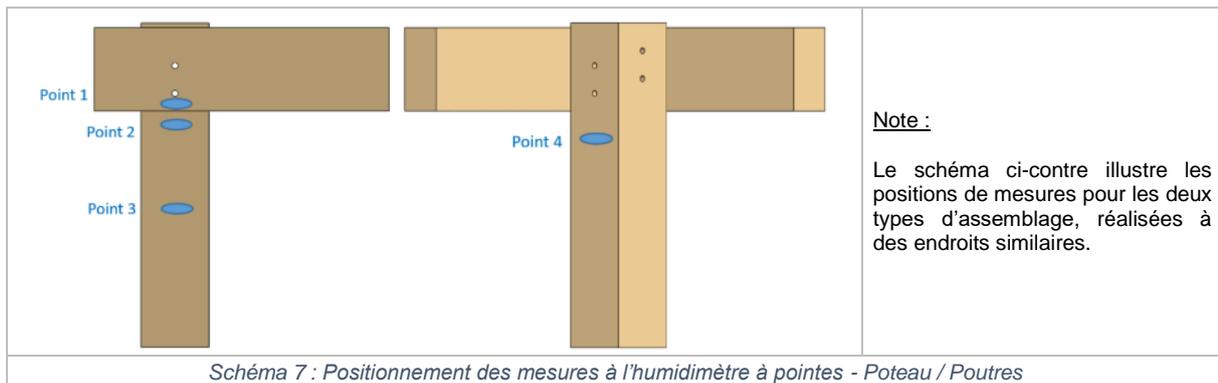
Photo 8 : Aperçu de la fente en tête de poteau – assemblage drainant Poteau / Poutres

## Mesures d'humidité à l'humidimètre à pointes :

Les mesures réalisées à l'humidimètre à pointes sont synthétisées ci-dessous, avec :

- Un schéma de positionnement des mesures réalisées
- Un graphique des mesures effectuées à l'état humide, 1h00 après la grande phase d'arrosage de 48h
- Un graphique des mesures effectuées à l'état sec, 5 jours après l'arrêt de la phase d'arrosage de 48h

Il faut rappeler que cette phase « sèche » représente un séchage naturel, sans ventilation, à la différence des précédentes phases de séchage.



Les deux graphiques illustrent les humidités mesurées à 4 ou 5 profondeurs différentes à partir de la surface (2,7 mm ; 7,1 mm ; 13,2 mm ; 18,7 mm et 28 mm). Nous avons ainsi un aperçu du gradient d'humidité sur une profondeur de l'ordre de 3 cm, à l'état humide et à l'état sec.

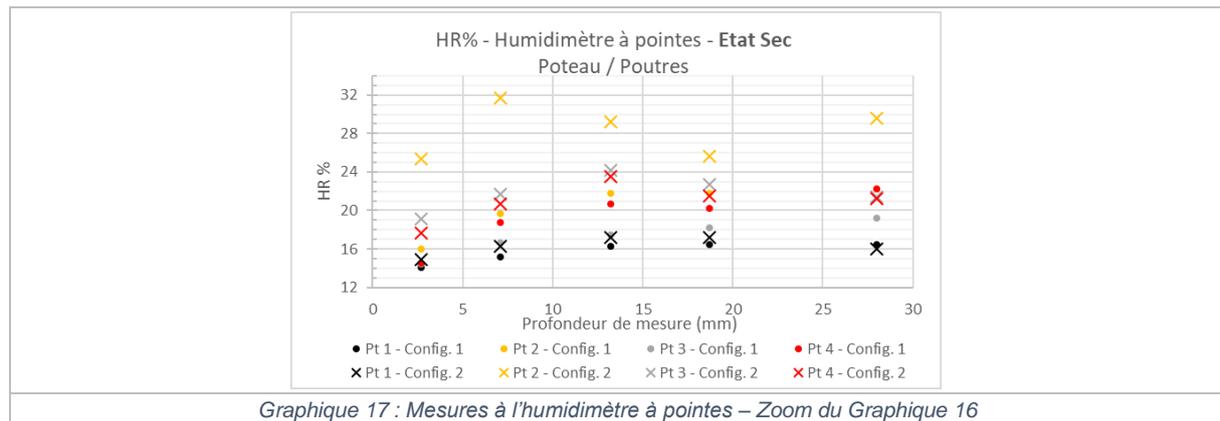
Ces mesures permettent premièrement de constater que :

- les poteaux se situent majoritairement (à l'état sec) à une humidité proche de 20% à partir d'une profondeur de 20 mm ;
- la poutre mesurée se situe (à l'état sec) à une humidité proche de 15% sur l'épaisseur mesurée.

La différence de comportement entre poteau et poutre est clairement mise en évidence et peut être attribuée essentiellement à deux facteurs : la massivité (poteau 145 x 145 mm contre poutre 95 x 180 mm) et l'orientation.

Le poteau de la solution drainante apparaît, essentiellement pour le point 2, comme détaché des autres éléments et plus humide, quelle que soit la profondeur de mesure.

Le graphique suivant correspond à un zoom du Graphique 16 précédent pour apporter plus de détails.



Graphique 17 : Mesures à l'humidimètre à pointes – Zoom du Graphique 16

A cette échelle, il est clair que les points 1 des deux configurations (représentant les mesures sur les poutres) se comportent de façon identique sur les trois premiers centimètres.

En ce qui concerne les poteaux, les constats majeurs suivants sont faits :

- Les mesures des points 3 et 4, des deux configurations, et du point 2 de la configuration classique, sont comprises entre 19% et 22% à 28 mm de profondeur, elles sont considérées équivalentes ;
- Seules les mesures du point 2 de l'assemblage drainant sont dissonantes au regard des autres. Ce constat est attribué à la fissure en tête de poteau évoquée précédemment (Photo 8). Par ailleurs, les mesures des points 3 et 4 de cette configuration sont systématiquement légèrement un peu plus élevées que celles effectuées aux mêmes endroits sur la configuration classique.

Enfin, la lecture des valeurs des points 3 (poteau) pour les deux configurations à une profondeur de 13 mm nous donne :

- Assemblage classique : 17,2 %
- Assemblage drainant : 24,2 %

Les valeurs obtenues à l'état sec avec l'humidimètre capacitif (Graphique 14, à l'abscisse de mesure N°11) sont mesurées très proches du point 3 de mesure avec l'humidimètre à pointes. Ces valeurs sont :

- Assemblage classique : 16,8 %
- Assemblage drainant : 25,2 %

Les deux principes de mesures sont différents, de même que la zone mesurée, néanmoins nous pouvons constater une bonne corrélation entre les humidités relevées. Cela permet d'apporter plus de robustesse aux constats faits à partir des mesures avec l'humidimètre capacitif.

Globalement, les différentes mesures complémentaires effectuées sont cohérentes entre elles et ne permettent pas de différencier clairement les assemblages. La seule divergence forte constatée apparaît liée à un défaut ponctuel de type « fente en tête de poteau ».

## 5.2.4 Synthèse et conclusion pour l'assemblage Poteau / Poutres

L'ensemble des résultats des mesures complémentaires aux mesures d'humidité en continu permet d'apporter des éclairages sur la lecture des courbes obtenues. Il est en revanche délicat de tirer des enseignements quantitatifs de l'ensemble de ces mesures, du point de vue de la teneur en humidité qui était un des objectifs de ces mesures.

Quelques tendances peuvent être discutées :

- Les courbes d'humidité en continu (Graphique 11 et Graphique 12) semblent montrer que le poteau de la conception drainante absorbe moins d'eau que celui de la conception classique.
- Les mesures complémentaires, effectuées de façon ponctuelle dans le temps, apportent une autre vision du comportement :
  - A. Les variations de section conduisent à un comportement similaire entre les deux poteaux.
  - B. Les mesures à l'humidimètre capacitif montrent que le « poteau drainant » est plus humide que le « poteau classique » après les phases d'arrosage mais également que son séchage est plus rapide ce qui permet sur un temps long (66 h) de revenir à une même teneur en humidité.
- Il semble également pour le poteau, que la modification de conception pour la rendre drainante (espacement entre les pièces) conduit à une plus forte absorption d'eau du poteau et également à une désorption favorisée.

De même que pour la configuration contrefiche / arbalétrier, sans donnée de teneur en eau correctement quantifiée il est par contre impossible à ce stade de tirer des conclusions plus poussées et de se projeter plus à même dans la différence de durée de vie entre les deux configurations.

## 5.3 Faces en bois de bout

### 5.3.1 Détails des éléments et des points de mesures

L'objectif de cette partie de l'expérimentation, à la différence des deux cas précédents, ne consiste pas à comparer des comportements d'assemblages semblables différenciés par la conception.

Le but est ici de quantifier l'impact de l'exposition et de l'inclinaison de 5 faces en bois de bout, sur la cinétique de sorption / désorption.

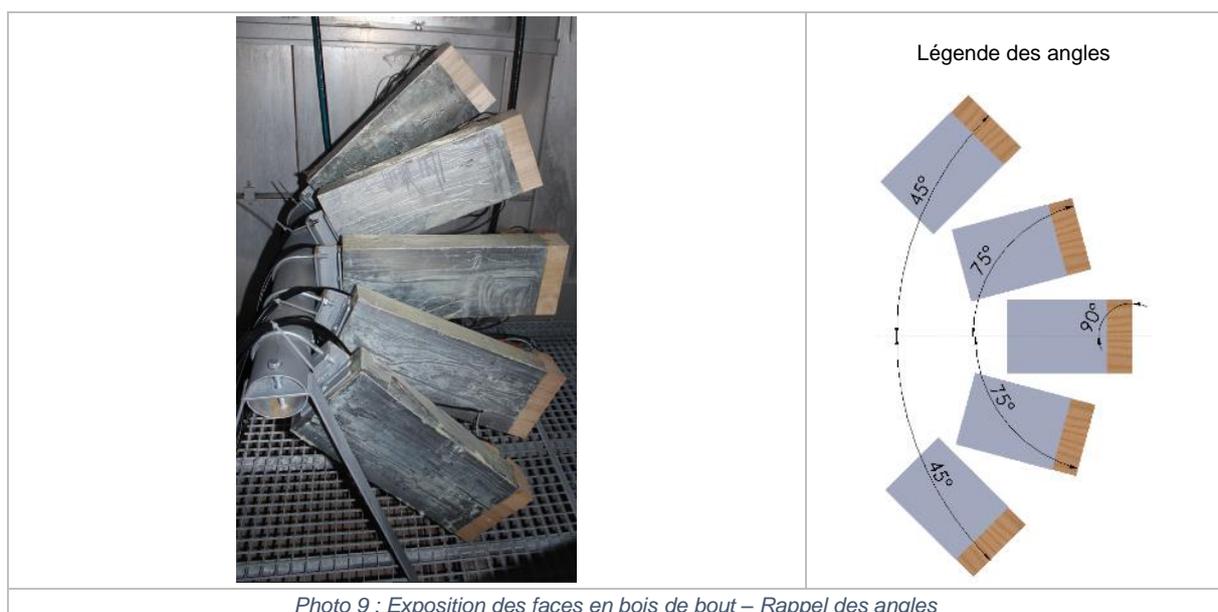


Photo 9 : Exposition des faces en bois de bout – Rappel des angles

Le schéma ci-dessous illustre les 6 points de mesure de l'humidité en continu, positionnés initialement.

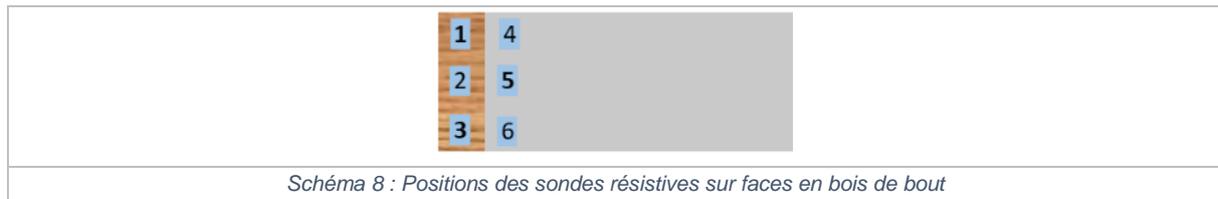


Schéma 8 : Positions des sondes résistives sur faces en bois de bout

Tel que le développe le rapport du Laboratoire Essais & Simulations, 3 sondes ont été débranchées pour limiter la quantité de courant électrique et également pour espacer physiquement les sondes de mesures alimentées.

Ainsi, les essais menés sur les faces en bois de bout concernent uniquement les sondes positionnées aux points N°1, N°3 et N°5.

### 5.3.2 Résultats des mesures d'humidité en continu

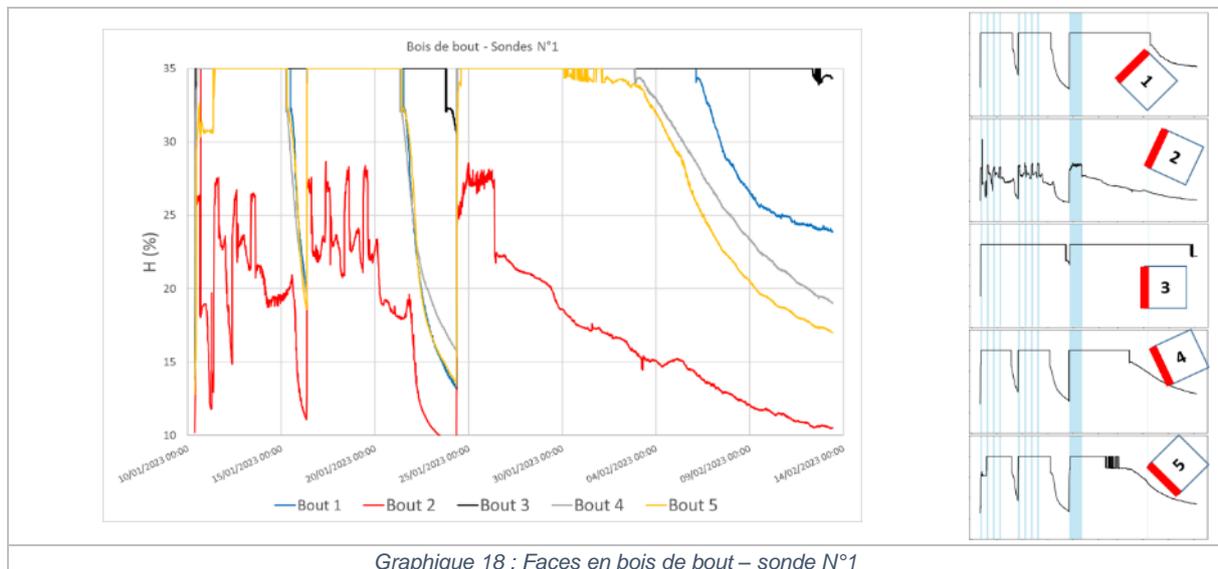
L'ensemble des résultats est présenté de manière exhaustive dans le rapport du Laboratoire Essais & Simulations.

Comme évoqué dans le rapport d'essais, au regard de certains phénomènes erratiques constatés, notamment en phase d'arrosage, les mesures d'humidité en continu ne peuvent être considérées comme précises et justes, 100% fiables. Les mesures complémentaires effectuées sont à prendre en compte pour l'analyse globale.

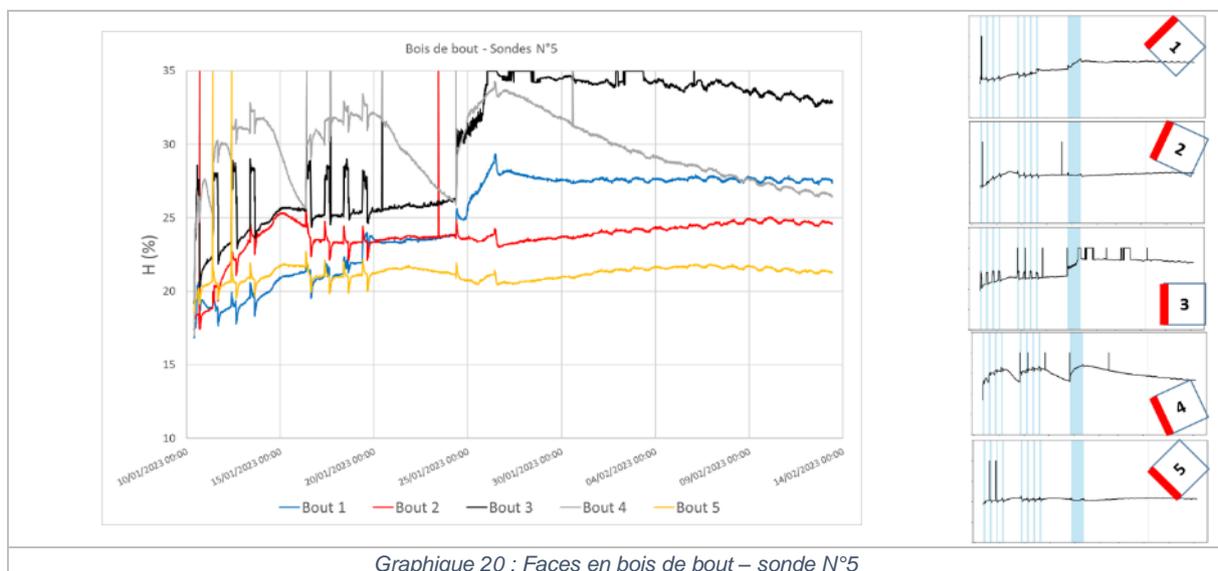
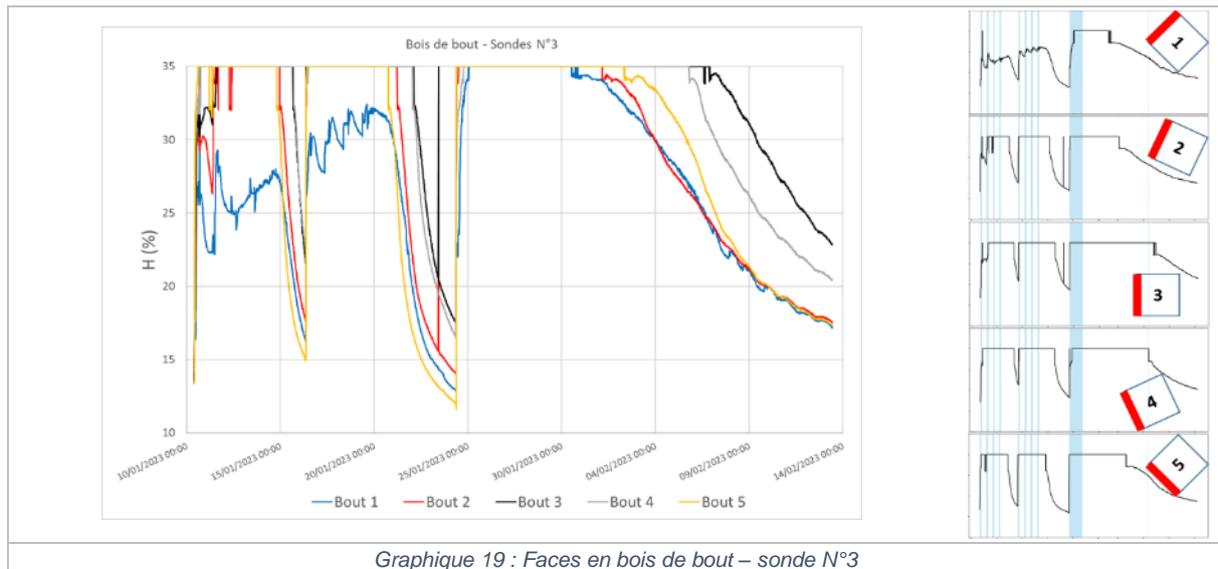
Dans un premier temps, les mesures en continu sont synthétisées en cumulant sur un même graphique les résultats obtenus par les sondes situées à la même position (positions illustrées au Schéma 8) sur les 5 échantillons de faces en bois de bout.

La partie à droite du graphique illustre par des vignettes les signaux individuels avec l'affichage en bleu ciel des périodes d'arrosage (non représentées sur le graphique cumulé), et un rappel de l'inclinaison des faces et de leur numérotation.

Malgré certaines mesures « erratiques », l'ensembles des résultats des 3 sondes pour chaque face en bois de bout est présenté.



Graphique 18 : Faces en bois de bout – sonde N°1



De même que précédemment, les sondes réagissent nettement aux changements d'états séchage/arrosage, de façon plus ou moins marquée et avec un temps de latence plus ou moins long. Ces courbes semblent ainsi montrer des tendances de cinétique de sorption/désorption d'eau au fil des cycles. Avant de les analyser directement, les mesures complémentaires effectuées sont présentées.

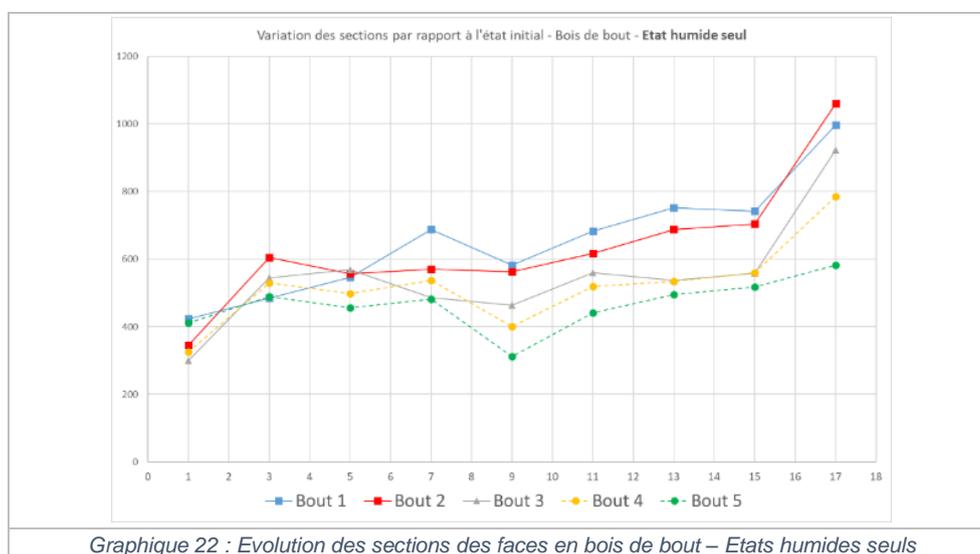
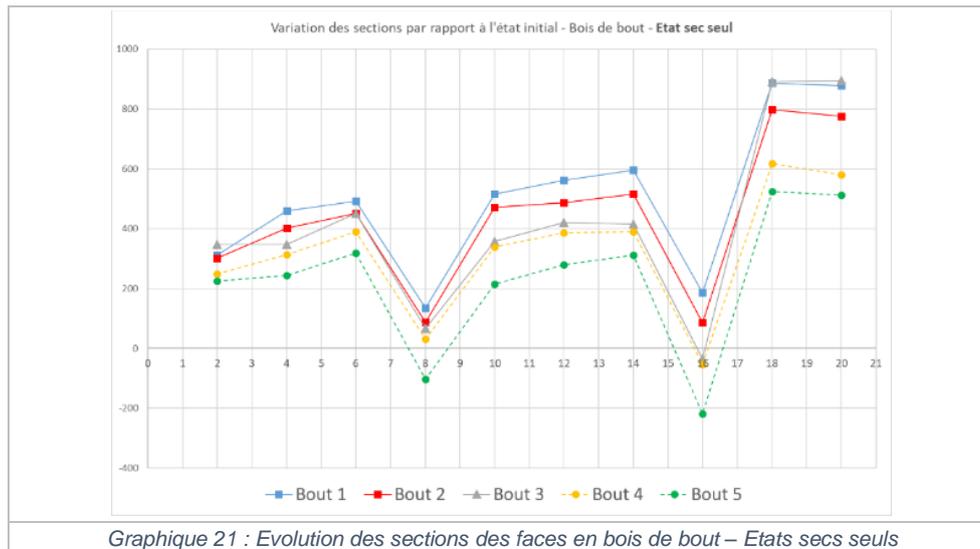
### 5.3.3 Résultats des mesures complémentaires

#### Mesures dimensionnelles :

Les deux dimensions des sections transversales de chaque pièce ont été mesurées aux deux états « humide et sec ». L'état humide correspond à 1h00 après la fin de la phase d'arrosage, l'état sec correspond à 30 minutes avant le lancement de la phase d'arrosage suivante.

Les 5 pièces ne possèdent pas exactement le même débit, ainsi les mesures effectuées ne sont pas comparées en terme de dimensions linéaires (largeur et épaisseur) mais en terme de sections pour s'affranchir au mieux de cette différence de débit.

Les graphiques suivants représentent ainsi les évolutions calculées des sections, en se référant, à chaque pas, à l'état initial. Pour ce cas précis l'évolution des sections est dissociée entre mesures à l'état sec et à l'état humide.



La mesure des dimensions au pied à coulisse est une mesure fiable. L'incertitude majeure dans le traitement et l'analyse de ces valeurs est essentiellement liée à l'apparition et au développement de fentes qui peuvent impacter les mesures réalisées, notamment à l'état sec.

Le premier graphique (Graphique 21) à l'état sec montre clairement un gonflement, de façon cumulative, entre les points N°2 et N°6 puis N°10 et N°14. On constate également très clairement entre les points N°16 et N°18 le gonflement plus important lié à la phase d'arrosage de 48 h.

L'aspect cumulatif du gonflement peut se retrouver sur le Graphique 22 avec une évolution globalement montante des différentes courbes.

Une lecture directe des courbes à l'état sec est effectuée pour réaliser un classement, de la pièce la plus humide à la moins humide, en faisant une analogie directe entre gonflement physique et reprise d'humidité. Cette lecture est faite en deux temps, avant et après la phase d'arrosage de 48 h :

- Avant la phase d'arrosage de 48 h
  - A. Bout 1 > Bout 2 > Bout 3 = Bout 4 > Bout 5**
- Après la phase d'arrosage de 48 h
  - A. Bout 1 = Bout 3 > Bout 2 >> Bout 4 > Bout 5**

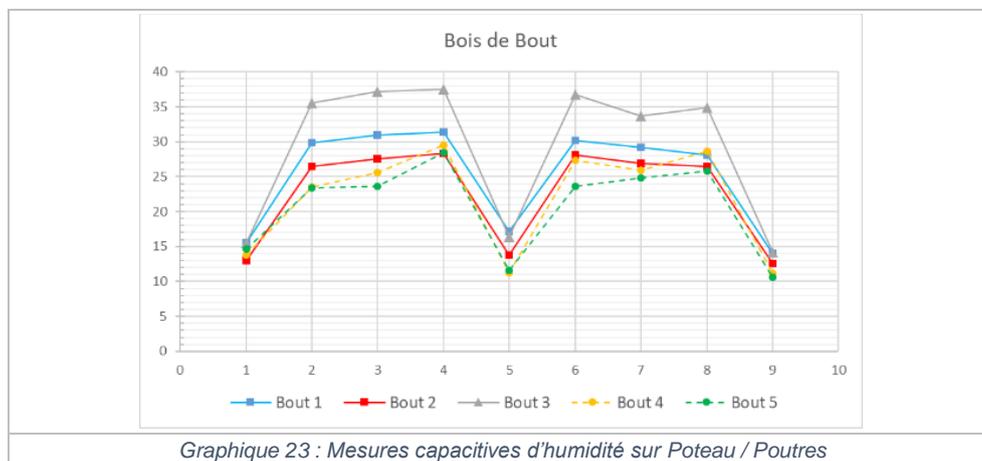
La même lecture est effectuée sur la courbe des mesures réalisées à l'état humide :

- Avant la phase d'arrosage de 48 h  
**A. Bout 1 ≈ Bout 2 >> Bout 3 = Bout 4 ≈ Bout 5**
- Après la phase d'arrosage de 48 h  
**A. Bout 2 ≈ Bout 1 > Bout 3 > Bout 4 >> Bout 5**

Une première conclusion quant à la sensibilité des faces en bois de bout en fonction de leur orientation et de leur inclinaison apparaît ici. Cette sensibilité est dans la logique attendue. Les autres mesures complémentaires sont à analyser pour confirmer ou infirmer cette première analyse.

## Mesures d'humidité à l'humidimètre capacitif :

Le graphique suivant synthétise des mesures d'humidité réalisées sur une zone comparable de chaque pièce avec l'humidimètre capacitif uniquement à « l'état sec ».



Graphique 23 : Mesures capacitives d'humidité sur Poteau / Poutres

A l'exception du Bout 3, le graphique ci-dessus est globalement en cohérence avec les mesures de variations dimensionnelles. Néanmoins, les différences entre chaque face en bois de bout apparaissent moins nettement marquées que pour les variations de section représentées au Graphique 21.

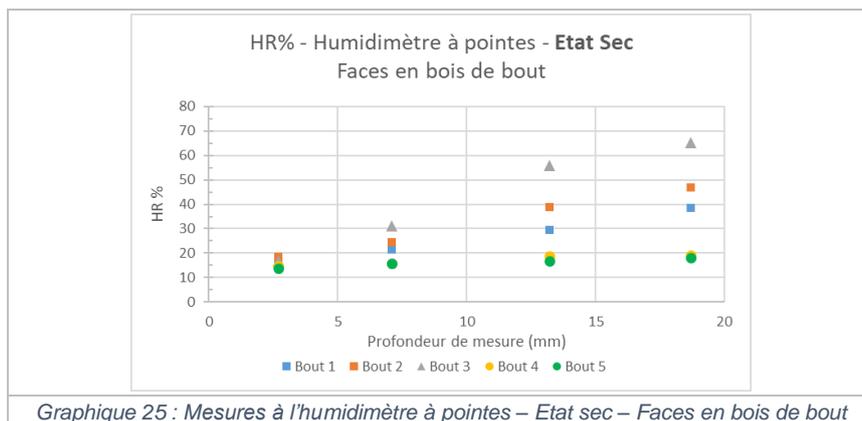
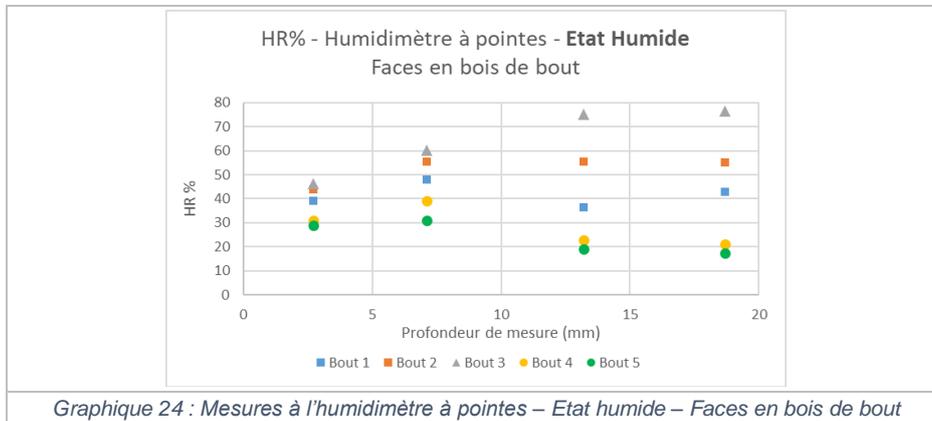
Pour une meilleure lecture du graphique ci-dessus, il faut rappeler qu'au-delà du Point de Saturation des Fibres (30% pour le peuplier) les valeurs mesurées ne sont pas fiables. Nous pouvons ainsi considérer que le Bout 1 et le Bout 3 ont un comportement quasiment identique, notamment sur la première grande phase, située entre les points N°1 et N°5. Par ailleurs, au regard de l'encombrement et de la mise en place d'une étanchéité sur le pourtour des échantillons ces mesures n'ont pu être effectuées que sur la face en bois de bout.

## Mesures d'humidité à l'humidimètre à pointes :

Les mesures réalisées à l'humidimètre à pointes sont synthétisées ci-dessous, avec :

- Un schéma de positionnement des mesures réalisées
- Un graphique des mesures effectuées à l'état humide, 1h00 après la grande phase d'arrosage de 48h
- Un graphique des mesures effectuées à l'état sec, 5 jours après l'arrêt de la phase d'arrosage de 48h

Il faut rappeler que cette phase « sèche » représente un séchage naturel, sans ventilation, à la différence des précédentes phases de séchage.



Les deux graphiques ci-dessus illustrent les humidités mesurées à 5 profondeurs différentes à partir de la surface (2,7 mm ; 7,1 mm ; 13,2 mm ; 18,7 mm et 28 mm). Nous avons ainsi un aperçu du gradient d'humidité sur une profondeur de l'ordre de 3 cm.

Ces mesures permettent premièrement, à l'état humide comme à l'état sec, d'isoler 2 groupes de réponses :

- Le premier groupe, constitué des Bouts 4 et 5, se situe à une humidité de l'ordre de 20% à partir de 13 mm de profondeur ;
- Le second groupe, constitué des Bouts 1, 2 et 3, est saturé en humidité entre 13 mm et 19 mm ; le Bout 3 est cependant très proche de l'état saturé à partir d'une profondeur de 13 mm.

Il faut rappeler à ce stade que toute mesure au-delà de 30% peut être considérée comme égale à 30%.

Hormis pour le Bout 3, ces mesures sont en cohérence avec les variations de sections mesurées et calculées précédemment. Elles tendent à confirmer le « classement » effectué sur les Bouts 1, 2, 4 et 5.

Afin de compléter l'analyse de ces données et permettre d'interpréter au mieux ces résultats et la divergence apparente du Bout 3, les précisions suivantes sont apportées ou rappelées :

- Les mesures à l'humidimètre à pointes n'ont été réalisées que sur la phase finale de l'expérimentation pour limiter l'endommagement au droit des points de mesure. Ainsi les échantillons avaient déjà subi 8 phases d'arrosage continu de 6 h et 8 phases de séchage de 18 h, 66h et 114 h.
- Il a pu être constaté que malgré leur faible durée apparente, les phases de séchage avec ventilation forcée minimale ont été d'une grande sévérité pour les éléments bois.

- Des fentes non négligeables sont ainsi apparues en cours d'expérimentation, relativement rapidement et leur impact sur les phénomènes approchés et les différentes mesures est potentiellement non négligeable.

Les photographies résumées dans le tableau suivant illustrent pour chaque éprouvette de face en bois de bout l'évolution de cette face entre les deux dates du 13/12/2022 et du 24/01/2023.

|            |   |   |   |   |   |
|------------|--|--|--|---|--|
| 13/12/2022 |   |   |   |   |   |
| 24/01/2023 |  |  |  |  |  |

*Tableau 3 : Illustration de l'évolution des faces en bois de bout – Apparitions de fentes*

Il faut noter qu'une étape non négligeable de développement, instrumentation et calage du protocole d'essai global a été réalisée sur les derniers mois de 2022. Les consignes de séchage avec ventilation forcée minimale et d'arrosage continu étaient identiques à celles appliquées par la suite en 2023.

Les photos de décembre 2022 montrent l'apparition de premières fentes qui se sont, par la suite, plus ou moins fortement développées au fil des cycles.

Nous pouvons ainsi constater que :

- La face en bois de bout 3, certainement du fait de son débit, présente les fentes apparentes en bout les plus nombreuses au 13/12/2022 ;
- Les fentes des différentes faces au 24/01/2023 sont importantes
- Les deux orientations « face en bois de bout vers le sol » semblent plus favorables (les fentes sont moins nombreuses, moins larges)

Ces fentes impactent notamment le phénomène de reprise d'eau et de séchage mais également les mesures d'humidité en continu avec les sondes résistives (perte de contact potentielle en bout de sonde). Ainsi il est possible de considérer que plus les cycles d'arrosage/séchage sont répétés plus l'impact de ces fentes est important.

En considérant ce phénomène, le comportement divergent du Bout 3 constaté avec les mesures d'humidimètre à pointes peut s'expliquer directement. Les fentes sont à considérer pour l'interprétation de l'ensemble des résultats.

## 5.3.4 Synthèse et conclusion pour les faces en bois de bout

L'ensemble des résultats des mesures complémentaires aux mesures d'humidité en continu permet d'apporter des éclairages sur la lecture des courbes obtenues. Il est en revanche délicat de tirer des enseignements quantitatifs de l'ensemble de ces mesures, du point de vue de la teneur en humidité qui était un des objectifs de ces mesures.

Les constats présentés aux §5.3.2 et §5.3.3 permettent d'amorcer quelques tendances :

- L'orientation des faces en bois de bout, vers le ciel ou vers le sol, semble avoir un impact sur le phénomène de fissuration en bout. Ce phénomène naturel, accéléré et certainement amplifié par la ventilation forcée au séchage bien que minimale, est d'une importance majeure au regard de la reprise d'eau liquide et de la durée de vie qui en découle. Les mesures d'humidité en continu ne permettent pas de se positionner avec assurance sur le comportement, notamment du fait de la présence de ces fentes.
- Les mesures complémentaires, effectuées de façon ponctuelle dans le temps, apportent une autre vision du comportement :

A. Les variations de section analysées au fil des cycles, avant la grande phase d'arrosage de 48 h (points N°16 des Graphique 21 et Graphique 22) conduisent à un « classement » relativement similaire des faces en bois de bout de la plus défavorable (reprise d'eau / gonflement plus importants) à la plus favorable (reprise d'eau / gonflement moins importants) :

- Bout 1  $\approx$  Bout 2 > Bout 3  $\approx$  Bout 4 > Bout 5.

Le comportement du Bout 3 est le plus erratique des 5 en fin d'expérimentation, essentiellement du fait des fentes majeures évoquées précédemment. La fin d'essai avec le « grand séchage » de 114 h et l'arrosage continu de 48 h ne sont pas considérés pour cette analyse.

B. Les mesures à l'humidimètre capacitif sont moins tranchées que les mesures dimensionnelles mais elles ne remettent pas en question le classement ci-dessus. Excepté pour le Bout 3, pour lequel la lecture d'humidité sur la face en bois de bout peut ainsi poser deux soucis de mesure (l'orientation par rapport au fil du bois et la présence des fentes)

C. Les mesures à l'humidimètre à pointes montrent clairement 3 « groupes de comportement » pour une mesure située dans la masse de la pièce, éloignée du bois de bout :

- Absorption limitée en profondeur (13 à 19 mm) et assez importante en surface (3 à 7 mm) : Bouts 4 et 5
- Absorption importante à très importante toutes profondeurs : Bouts 1 et 2
- Comportement erratique : Bout 3

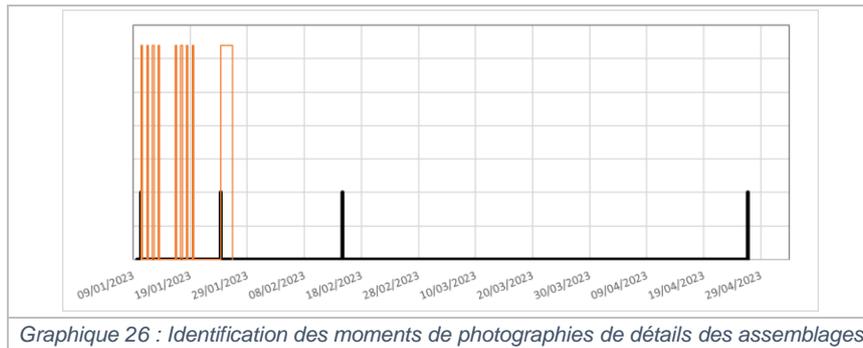
Il faut rappeler que ces mesures sont faites après le grand cycle d'arrosage de 48 h et après 5 jours de séchage naturel suite à ce cycle. Les faces en bois de bout présentaient donc des fentes non négligeables avant leur réalisation, dont l'impact est présent dans ces résultats.

De même que pour les différentes configurations précédentes d'assemblages (contrefiche / arbalétrier et poteau / poutres), sans donnée de teneur en eau correctement quantifiée il est impossible à ce stade de tirer des conclusions plus poussées et de se projeter plus à même dans la différence de durée de vie entre ces configurations.

## 5.4 Compléments d'informations et d'analyses sur les assemblages

### 5.4.1 Constats visuels de l'évolution des assemblages

Nous présentons ici des constats qualitatifs et lorsque possible quantitatifs, basés essentiellement sur les observations visuelles des 4 assemblages, effectuées à 4 moments illustrés sur le graphique suivant. La courbe en rouge illustre les cycles d'arrosage effectués (équivalent au Graphique 1) et les traits verticaux en noir correspondent aux prises de photographies présentées par la suite.



Les tableaux suivants résument les principales photographies effectuées sur les zones de boulonnage des assemblages pour chaque configuration, par date de prise de vue. La première date (9/11/2022) non représentée sur le Graphique 26 correspond à la fabrication des éprouvettes d'essai.

| 9/11/2022                | 10/01/2023               | 24/01/2023               | 14/02/2023 | 26/04/2023 |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------|------------|
|                          |                          |                          |            |            |
| Pas de photo exploitable | Pas de photo exploitable | Pas de photo exploitable |            |            |

Tableau 4 : Synthèse des photographies de l'assemblage drainant Contrefiche/Arbalétrier

| 9/11/2022   | 10/01/2023  | 24/01/2023  | 14/02/2023   | 26/04/2023  |
|---|---|---|--|---|
|  |  |  |  | Pas de photo exploitable  |
| Pas de photo exploitable  |  |  |  |  |

Tableau 5 : Synthèse des photographies de l'assemblage classique Poteau/Poutres

| 9/11/2022   | 10/01/2023  | 24/01/2023  | 14/02/2023   | 26/04/2023  |
|---|---|---|--|---|
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

Tableau 6 : Synthèse des photographies de l'assemblage drainant Poteau/Poutres

Nous pouvons premièrement constater dans les 3 cas la mise en compression de la rondelle d'étanchéité (rondelle E) entre la mise en œuvre (9/11/2022) et la première prise de vue (10/01/2023) après les cycles d'humidification/séchage de réglage de l'asservissement des essais et du système d'acquisition (courant Novembre et Décembre 2022).

Nous pouvons ensuite constater que la solution classique semble exercer plus de pression perpendiculaire sur la face de l'élément assemblé, avec une rondelle E qui apparaît plus comprimée et qui semble « disparaître » dans le bois par endroit. Les assemblages drainants compriment également cette rondelle E mais apparemment dans une moindre mesure.

#### 5.4.2 Derniers constats visuels sur assemblages avant démontage

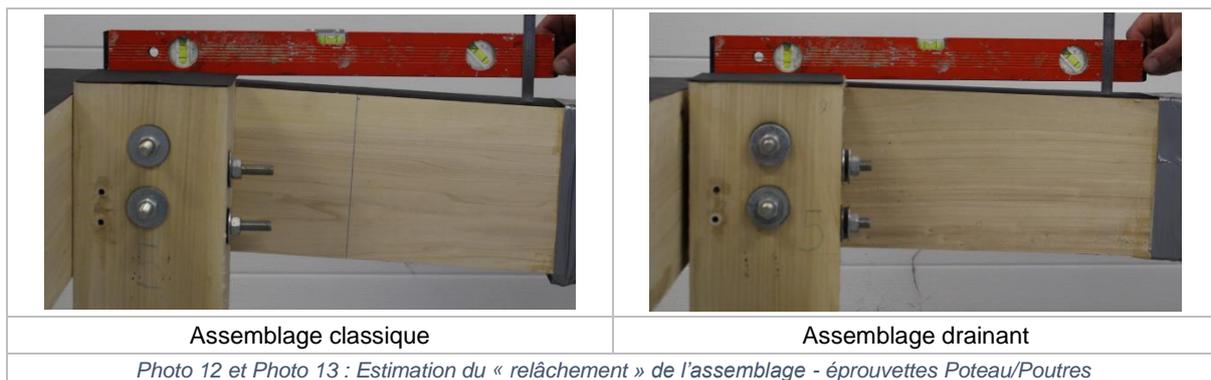
Comme illustré sur le Graphique 26 les photos du 26/04/2023 ont été réalisées après 3 mois de séchage naturel en ambiance intérieure. Les photos des solutions drainantes illustrent le séchage qui a opéré, avec le relâchement visible des rondelles ressort, moins comprimées qu'à l'état initial. Ce phénomène de relâchement n'apparaît pas directement au niveau de la rondelle E sur l'assemblage classique.

En revanche, le relâchement des assemblages lié au séchage des éléments bois est clairement visible sur les éprouvettes poteau-poutre directement. Les photographies ci-dessous illustrent ce constat sur les deux assemblages.



Ces deux premières photos permettent de voir que les lignes directrices des poutres et du poteau ne sont plus perpendiculaires, dans les deux cas. Il apparaît nettement malgré tout que l'assemblage qui s'est le plus relâché est l'assemblage classique. Nous pouvons notamment apercevoir la face supérieure de la poutre de gauche, non visible dans le cas de l'assemblage drainant.

Les photos suivantes illustrent la quantification de ce déplacement. La déformation verticale maximale mesurée pour l'assemblage classique (3 cm) est le double de celle mesurée sur l'assemblage drainant (1,5 cm).



Par ailleurs, d'un point de vue qualitatif, les manipulations des éprouvettes montraient clairement une différence. Bien que l'assemblage drainant affiche un léger affaissement de la poutre, l'éprouvette demeurerait globalement raide et sans jeu facilement mobilisable, au contraire de l'assemblage classique.

### 5.4.3 Constats après démontage des assemblages

Les 4 assemblages ont été démontés et les principaux constats suivants ont pu être réalisés :

- Les assemblages classiques avec des faces en contact montrent tous les deux des traces de développement de moisissure. Ces traces sont nettement plus marquées pour l'assemblage Poteau/Poutres que pour l'assemblage Contrefiche/Arbalétrier. Ce dernier constat semble logique au regard de l'exposition moins défavorable du tenon/mortaise de cet assemblage. Néanmoins, la face extérieure de l'embranchement laisse apparaître des traces. Les photographies ci-après illustrent ce constat.
- Les assemblages drainants ne laissent apparaître aucune trace de moisissure sur les faces internes des assemblages, y compris en sous-face des rondelles EE après les avoir déposées.
- Qu'il s'agisse des assemblages classiques ou drainants, aucune trace de moisissure n'a été relevée sous la zone en contact avec les rondelles E. L'aspect comprimé des rondelles E illustré précédemment au §5.4.1 est en cohérence avec ce constat. L'étanchéité semble assurée à ce niveau.
- Les empreintes sur les faces, liées à la compression perpendiculaire du bois par les rondelles E et EE est fortement marquée. Elle est nettement plus marquée dans le cas de l'assemblage classique. Les photographies ci-après illustrent ce phénomène ainsi que le tableau des valeurs mesurées.



Photo 14 et Photo 15 : Légères traces de moisissures sur les faces de l'assemblage Contrefiche/Arbalétrier



poutre



Poteau face contre poutre



Poteau face contre solive



solive

Photo 16, Photo 17, Photo 18 et Photo 19 : Traces de moisissures sur les 4 faces de l'assemblage Poteau/Poutres

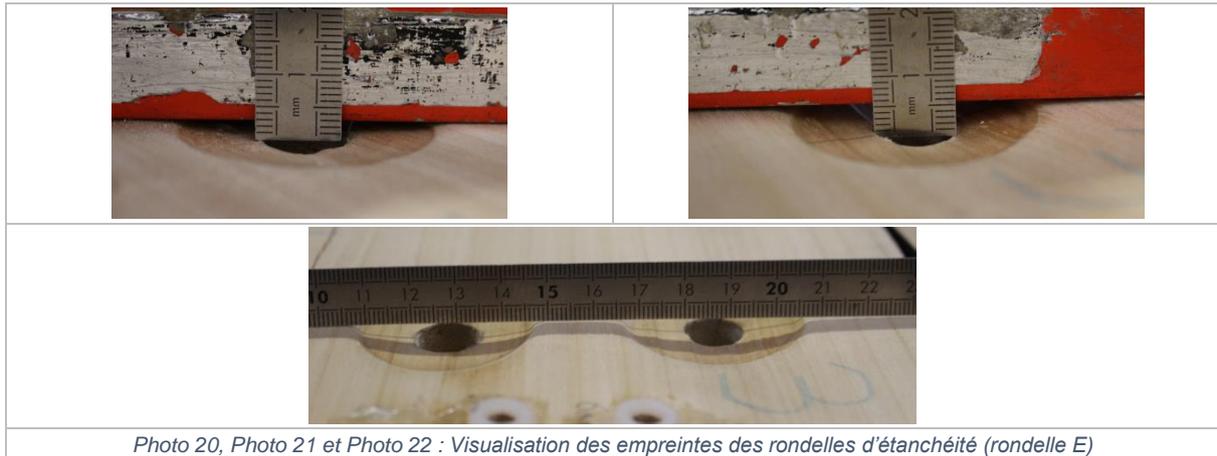


Photo 20, Photo 21 et Photo 22 : Visualisation des empreintes des rondelles d'étanchéité (rondelle E)

Le tableau ci-dessous résume les valeurs minimales et maximales constatées pour les empreintes sous les rondelles E en fonction des assemblages. Ces mesures ont été réalisées avec une précision relative, au réglet, tel qu'illustré sur les photos ci-dessus.

| Configuration | Élément  | Empreinte mini (mm) | Empreinte maxi (mm) |
|---------------|----------|---------------------|---------------------|
| Classique     | Poutre 1 | 3,5                 | 4                   |
|               | Poutre 2 | 5                   | 6                   |
|               | Poteau   | 2                   | 4                   |
| Drainante     | Poutre 1 | 1,5                 | 2,5                 |
|               | Poutre 2 | 1                   | 1                   |
|               | Poteau   | 1                   | 3                   |

Tableau 7 : Synthèse des photographies de l'assemblage drainant Poteau/Poutres

Pour les 8 rondelles EE déposées sur l'assemblage drainant Poteau/Poutres, les profondeurs d'empreintes constatées se situent toutes entre 1 et 1,5 mm.

## 5.5 Synthèse et conclusion des essais de cinétique de sorption / désorption

Ce programme expérimental a été lancé à la suite des travaux du guide de Conception des Ouvrages Bois Exposés aux Intempéries (COBEI) qui ont conduit à la proposition de solutions de conceptions nouvelles, pour la charpente en bois notamment, dont la vocation est d'être « drainantes et ventilées » pour limiter la reprise d'eau, favoriser l'assèchement et ainsi augmenter les performances de durabilité, soit la durée de vie des ouvrages. Par ailleurs le guide COBEI a proposé une évolution de classement du « niveau de conception » des faces en bois de bout (au sens du FD P 20-651) au regard de ce que propose actuellement le NF DTU 31.1.

Les différents assemblages et éprouvettes avec faces en bois de bout exposées étaient dédiées à apporter de la robustesse aux propositions du guide ou, le cas échéant, à mettre en évidence un phénomène non attendu.

Les problématiques métrologiques rencontrées ne nous permettent pas d'avoir une idée quantifiée et affinée des phénomènes de sorption/désorption et des niveaux réels que l'humidité peut atteindre. Il est par conséquent très délicat de discriminer les solutions entre elles. Par ailleurs le comportement même du peuplier face aux cycles considérés « légers », « non violents », montre qu'un affinage des conditions expérimentales est nécessaire, et fortement lié à l'essence choisie.

Ainsi, les résultats présentés dans les chapitres précédents ne sont pas ceux escomptés initialement. Néanmoins, les mesures résistives ainsi que les compléments apportés au fil du projet ont permis de dégager des premières tendances qu'il faudra conforter.

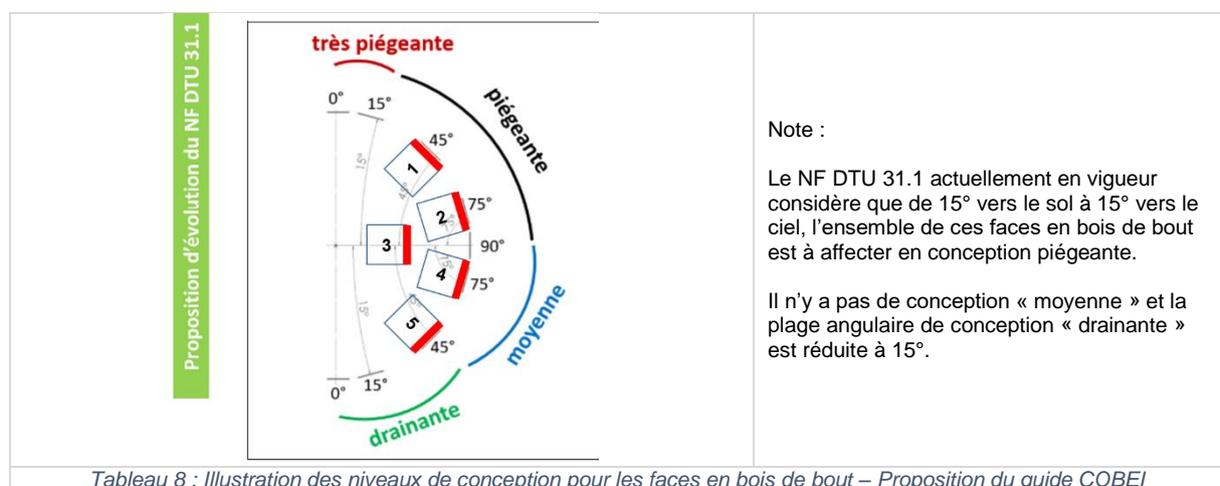
Dans le cas des assemblages, il apparaît que l'espacement ménagé entre les pièces, pour conférer drainage et ventilation, favorise la reprise d'eau des éléments (notamment lorsque la face en bois de bout se trouve « exposée ») mais également la désorption. Il n'est pas apparu qu'un tel assemblage a conduit à un excès de reprise d'eau cumulé dans le temps. L'absorption est favorisée, la désorption également.

Dans le cas des faces en bois de bout, une des grosses difficultés est l'importance des fentes apparues sur ces différentes faces à l'avancement des cycles d'arrosage/séchage. Elles peuvent à la fois impacter les phénomènes de sorption/désorption et également les mesures effectuées.

Néanmoins les constats effectués apportent une première « classification » de ces faces en bois de bout avec deux « groupes » clairement différenciés : les faces tournées vers le ciel ou vers le sol. Les faces tournées vers le sol sont plus favorables (reprise d'eau moindre et apparition des fentes plus tardive et moindre).

La face en bois de bout N°3, dont la face est à la verticale est celle pour laquelle il est délicat de se positionner au regard des mesures effectuées. Cette face est celle présentant le débit le plus défavorable et en conséquent les fentes les plus précoces et certainement les plus impactantes sur le comportement.

Le schéma ci-dessous rappelle la proposition effectuée dans le cadre du guide COBEI pour une nouvelle affectation du niveau de conception relatif aux faces en bois de bout en lien avec les choix du NF DTU 31.1 et avec le FD P 20-651. Le rappel des bouts N°1 à N°5, testés dans cette étude, est effectué sur le schéma.



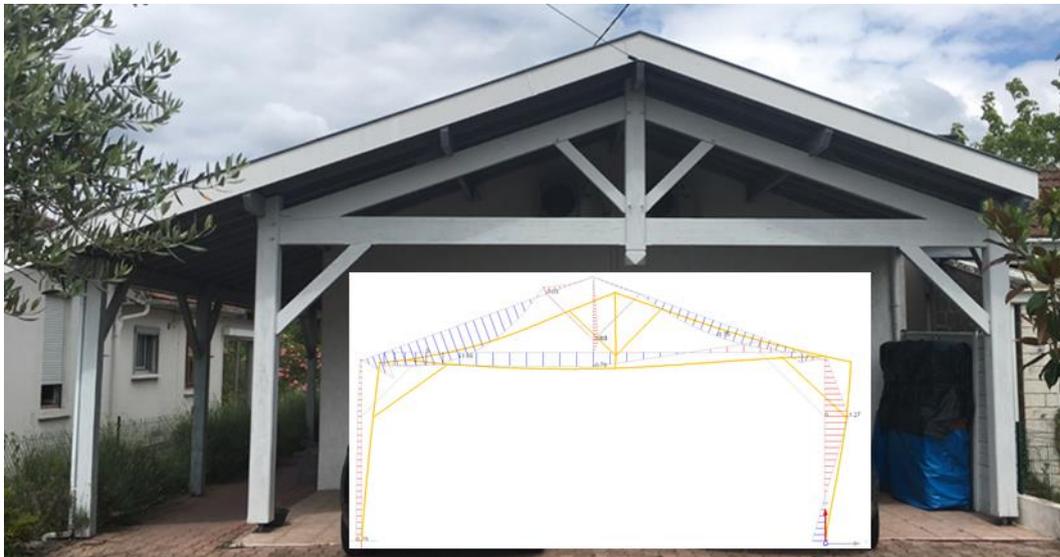
Les premiers résultats obtenus semblent conforter l'idée d'étendre la plage drainante au-delà de 15°. L'idée de l'existence d'une plage de conception moyenne est également confortée avec les résultats du bout N°2. Le maintien des faces tournées vers le ciel en conception piégeante apparaît également cohérent. Les questions demeurent au niveau des frontières réelles à proposer et surtout du classement auquel pourrait prétendre une face telle que le bois de bout N°3, dans la mesure où le comportement observé et mesuré n'est pas considéré représentatif.

Ces premiers constats et analyses restent à conforter avec notamment des mesures plus fines réalisées sur des éléments bois sollicités « plus délicatement » pour limiter l'amplification des comportements naturels (fentes) pouvant fausser le comportement observé

D'un point de vue expérimental, la technologie de mesure a été poussée au-delà de ses limites, néanmoins la technique résistive apparaît toujours comme un choix intéressant. L'évolution de ce système pour le rendre apte à ce type d'expérimentation ainsi que l'évolution du conditionnement expérimental (arrosage / humidification, séchages naturels/contrôlés/forcés...), sont des voies à travailler dans le futur.

Enfin, ce projet a été initialement prévu sur un an, pari qui apparaît désormais comme trop risqué. En effet, le besoin d'accélérer les phénomènes naturels est la base de nos approches expérimentales d'un point de vue recherche et développement ou qualification de produits. Cette partie expérimentale, axée recherche et développement, s'est clairement confrontée à la problématique de trop condenser le temps expérimental. Les phénomènes de sorption/désorption sont naturellement très longs et les étudier de façon accélérée est nécessaire. Ce projet aura permis de mettre en évidence certaines limites à ce niveau pour, le cas échéant, mieux calibrer la suite expérimentale que ces premiers résultats appellent.

# Projection dans le dimensionnement mécanique



## 6 Généralités de cette partie de l'étude

En parallèle de la rédaction du guide de Conception des Ouvrages Bois Exposés aux Intempéries, une campagne expérimentale a été menée pour caractériser l'impact de la mise en œuvre d'un espacement entre les pièces assemblées (bois/bois et bois/métal) sur la raideur et la résistance en cisaillement.

La synthèse de ces résultats se retrouve en page 37 du guide COBEI, dont voici les extraits :

|   |  |
|---|--|
| Proposition d'évolution du NF DTU 31.1  | <b>Justification mécanique des assemblages drainants en cisaillement</b>   |
|   | <p><b>Domaine de validité :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Organes d'assemblages métalliques de type tiges de diamètre             <ul style="list-style-type: none"> <li>o <b>compris entre 4 et 20 mm</b></li> </ul> </li> <li>- Espacement maximal à la mise en œuvre de :             <ul style="list-style-type: none"> <li>o <b>10 mm pour un assemblage bois / bois</b></li> <li>o <b>5 mm pour un assemblage bois / métal</b></li> </ul> </li> </ul> <p><b>Approche générale en résistance :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour l'assemblage prévu, la résistance caractéristique en cisaillement <math>F_{v,Rk}</math>, sans espacement, est calculée sur la base des équations des chapitres 8.2.2 et 8.2.3 de l'Eurocode 5</li> <li>- <b>L'assemblage est envisageable avec espacement seulement si</b> la valeur <math>F_{v,Rk}</math> est liée aux modes de rupture avec rotule(s) plastique(s) de l'organe d'assemblage (d, e, f, j, ou k en assemblage bois / bois et d, e, g, h, k ou m en assemblage bois / métal)</li> <li>- <b>Alors</b> la résistance caractéristique effective en cisaillement de l'assemblage drainant est obtenue en <b>multipliant la valeur <math>F_{v,Rk}</math> par le coefficient 0,67.</b></li> </ul> <p style="text-align: center;"><math>F_{v,Rk,drainant} = 0,67 \times F_{v,Rk}</math></p> |
| <i>Tableau 9 : Extrait du guide COBEI (p 37) – Impact des assemblages drainants sur la résistance</i> |  |

|   |   |   |
|---|---|---|
| Proposition d'évolution du NF DTU 31.1  | <b>Approche générale en raideur :</b>   |   |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Approche possible dans la mesure où les conditions de validité de l'approche en résistance sont respectées (rotule(s) plastique(s)).</li> <li>- Pour l'assemblage prévu, la raideur en cisaillement <math>K_{ser}</math>, par plan de cisaillement et sans espacement, est calculée sur la base des équations du chapitre 7.1 de l'Eurocode 5</li> <li>- <b>Alors</b> la raideur effective en cisaillement, par plan de cisaillement, de l'assemblage drainant, est obtenue en :             <ul style="list-style-type: none"> <li>o <b>multipliant la valeur <math>K_{ser}</math> par le coefficient 0,5 pour les diamètres 4 mm à 10 mm ;</b></li> <li>o <b>multipliant la valeur <math>K_{ser}</math> par le coefficient 0,8 pour les diamètres 12 mm à 20 mm ;</b></li> </ul> </li> </ul> |   |
|   | <b>Ø 4 mm à Ø 10 mm</b>   | $K_{ser,drainant} = 0,5 \times K_{ser}$ |
|   | <b>Ø 12 mm à Ø 20 mm</b>  | $K_{ser,drainant} = 0,8 \times K_{ser}$ |
| <i>Tableau 10 : Extrait du guide COBEI (p 37) – Impact des assemblages drainants sur la raideur</i> |   |   |

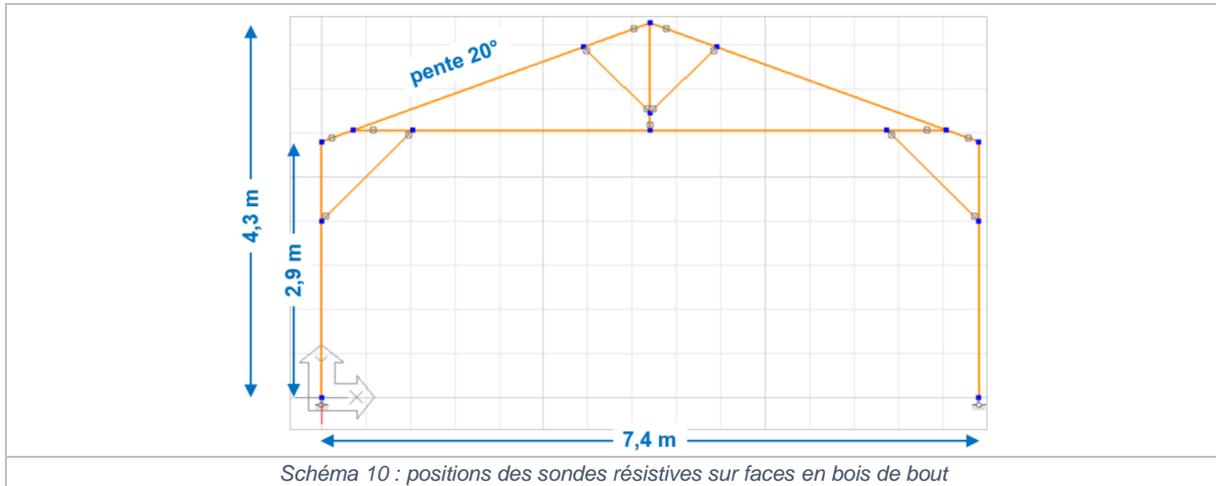
Cette partie théorique de l'étude a consisté à se projeter dans le dimensionnement mécanique d'un ouvrage spécifique en considérant plusieurs approches.

- Une première approche, classique bien que partiellement erronée, consistant à considérer l'ensemble des assemblages comme étant des rotules ;
- Une deuxième approche, académique, consistant à affecter aux assemblages leurs raideurs théoriques ;
- Une dernière approche, exploratoire, consistant à considérer l'affaiblissement des raideurs lié à la conception drainante.

L'ouvrage modélisé et calculé, de type ferme, comprend des assemblages moisés bois/bois/bois et bois/métal/bois faisant intervenir 1 ou plusieurs boulons.

## 7 Hypothèses retenues

L'ouvrage considéré pour cette approche théorique est une ferme de loggia, dont la composition et les dimensions générales sont résumées par le schéma ci-dessous.

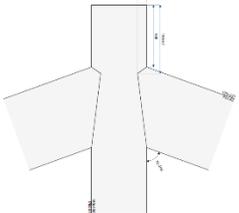
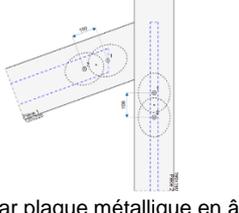
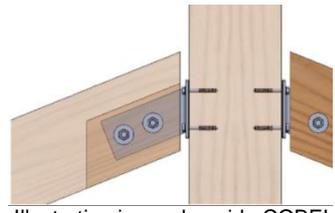
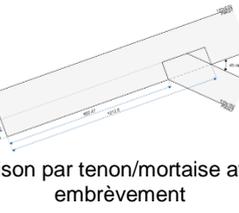
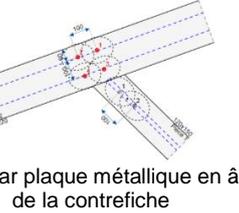
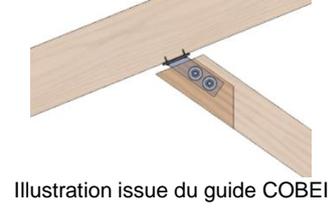


### Conception globale :

Les choix ont été faits en lien avec ceux effectués pour l'exemple des « charpentes extérieures de loggia » du chapitre 2.4 du guide COBEI :

- Les poteaux sont moisés sur les arbalétriers et sur les liens
- L'entrait est moisé sur les arbalétriers et sur les liens

Deux premiers cas de calculs ont été réalisés pour conforter l'hypothèse selon laquelle le type de ferme considéré ne modifiait pas le comportement global. Les solutions dites « avec débord de toiture » et « sans débord de toiture » ont ainsi été modélisées. La différence se situe uniquement au niveau des liaisons arbalétrier/poinçon et arbalétrier/contrefiche, telles que représentées ci-dessous dans le logiciel Acord :

|  |   |  |
|--|---|--|
|  <p>Liaison par embrèvement</p>                     |  <p>Liaison par plaque métallique en âme de l'arbalétrier</p>  |  <p>Illustration issue du guide COBEI</p> |
|  <p>Liaison par tenon/mortaise avec embrèvement</p> |  <p>Liaison par plaque métallique en âme de la contrefiche</p> |  <p>Illustration issue du guide COBEI</p> |
| Solutions classiques   | Solutions drainantes  |  |
| Tableau 11 : Illustration des deux types d'assemblages considérés en phase initiale  |   |  |

Note : à ce jour les assemblages envisagés dans le guide COBEI (images extraites ci-dessus) ne sont pas modélisables directement sur les logiciels de calcul. Raison pour laquelle les images de « plaques en âme » apparaissent comme une « plaque en âme dans les deux pièces ». Cette « astuce » de modélisation a été utilisée et seuls les résultats du côté représentatif de l'assemblage ont été regardés.

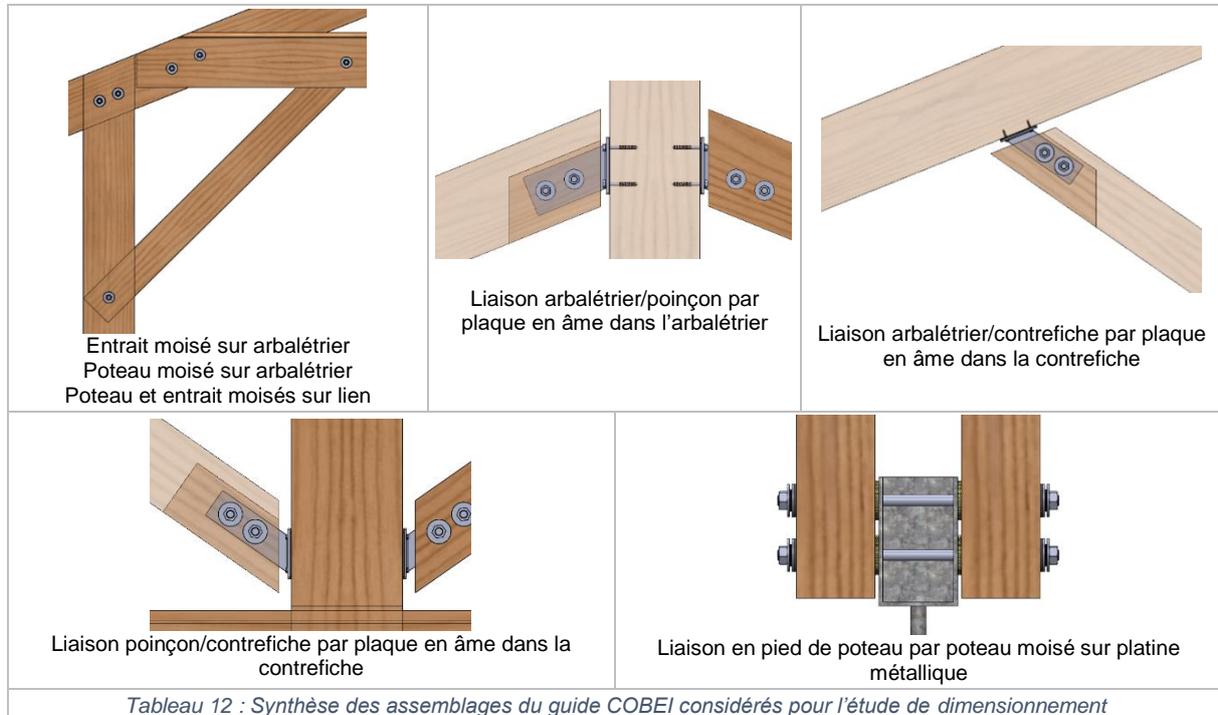
Les résultats obtenus ont permis de confirmer qu'il n'y avait aucun impact sur les taux de travail des divers assemblages de l'ensemble de la ferme, hormis les 2 assemblages mentionnés dans le tableau ci-dessus.

**Ainsi, le cas de ferme retenu pour les différentes modélisations est celui de la ferme sans débord de toiture.**

Nous rappelons ici que ce cas n'est pas le plus représentatif de la réalité, et surtout ne devrait pas l'être, dans la mesure où le débord de toiture est le premier choix de conception qui va augmenter la durée de vie de la ferme, notamment sur sa partie haute.

Ce cas est retenu car c'est celui qui confère le maximum d'assemblages drainants, dont l'étude d'impact sur la mécanique globale de l'ouvrage est l'objectif de cette partie dimensionnement.

Les principaux détails d'assemblages de cette solution, proposés par le guide COBEI, sont rappelés ci-dessous, et commentés le cas échéant.



### Sections des différentes pièces :

- Poteau : 80 x 200 mm (x 2)
- Arbalétrier : 120 x 220 mm
- Entrait : 80 x 220 mm (x 2)
- Poinçon : 160 x 160 mm
- Contrefiche : 120 x 150 mm
- Lien : 120 x 150 mm

### Matériaux :

- Les éléments sont en bois massif de classe de résistance mécanique C24
- Les boulons sont de la classe 6.8
- Les plaques métalliques en âme sont en acier S235

### Chargement :

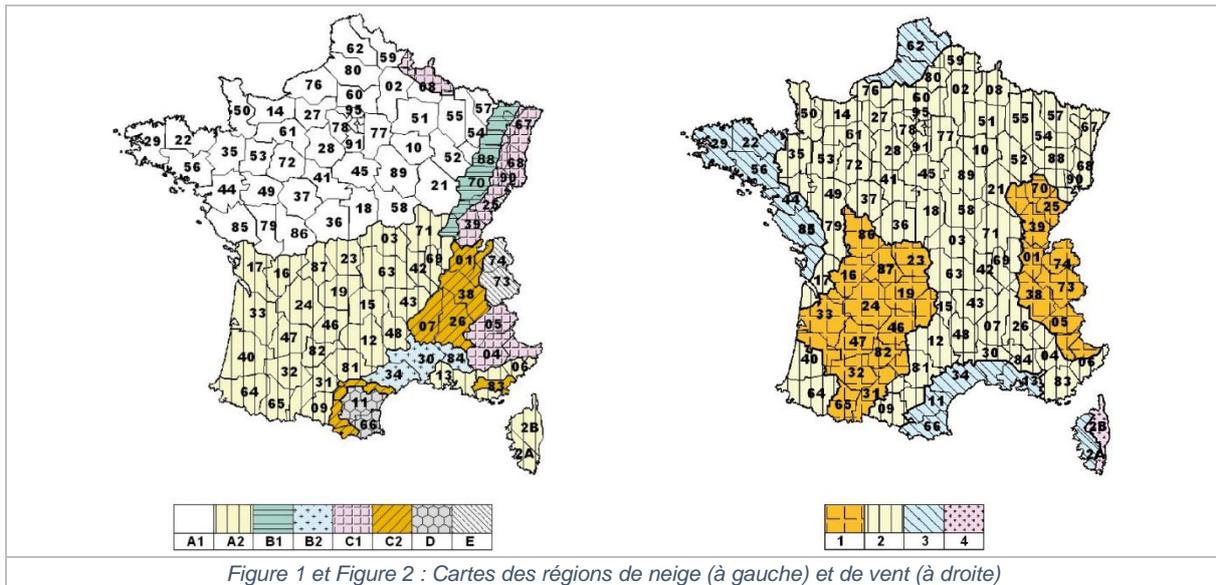
- La région de neige considérée est la région A2 (altitude > 200 m)
- Régions de vent considérées : 1 et 2
- Calcul du vent : prise en compte des surfaces ouvertes
- Charges permanentes considérées : 50 daN/m<sup>2</sup>
- Bande de chargement de la ferme : 1,5 m (⇔ avancée de loggia d'une profondeur de 3 m)

Les calculs initiaux ont été menés pour deux cas de vent (régions 1 et 2) et pour la région de neige A2 à une altitude inférieure à 200 m.

Les deux régions de vent (1 et 2) ont été considérées dans une première approche de sensibilité.

Au regard des résultats obtenus sur 6 variantes de configurations, seuls les cas de calculs et résultats obtenus sur la région de vent 2 ont été retenus pour être présentés dans ce rapport.

Pour rappel les régions de neige et de vent définies par l'eurocode 1 parties neige et vent et leurs annexes nationales française (NF EN 1991-1-3 +NA et NF EN 1991-1-4 +NA) sont illustrées sur les deux figures ci-dessous.

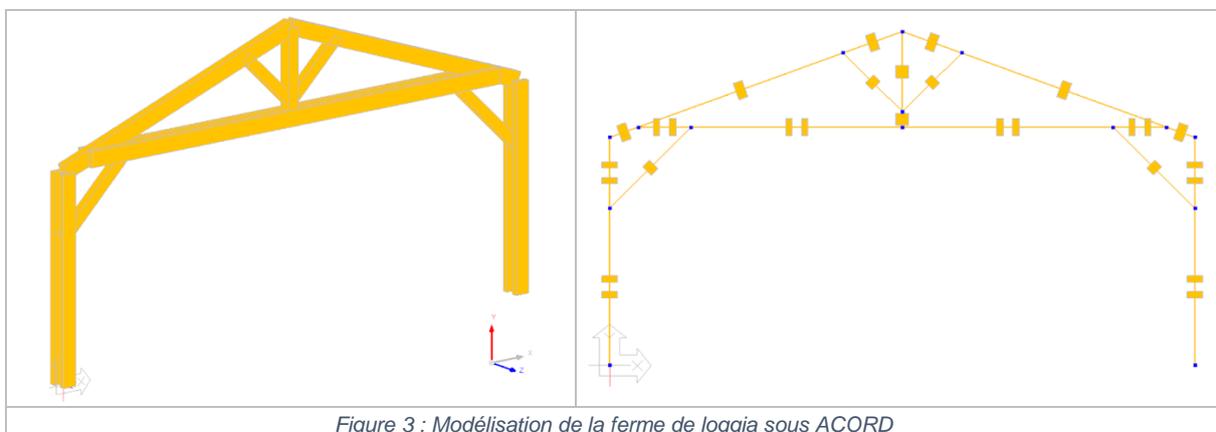


Ces cas de calculs ne permettent pas de couvrir l'ensemble du territoire métropolitain. Néanmoins cette approche de dimensionnement en couvre une grande partie et permet d'avoir un premier aperçu de l'impact des conceptions drainantes sur un ouvrage courant de charpente extérieure.

### Hypothèses générales de calcul :

La modélisation et le calcul de la ferme (éléments bois + assemblages) sont réalisés à l'aide du logiciel ACORD conformément aux règles Eurocodes.

Le modèle global retenu pour l'ensemble des calculs est illustré par les deux vues de la figure ci-dessous.



Les spécificités liées aux raideurs des assemblages notamment sont introduites au niveau des différents nœuds et détaillées par la suite.

L'ensemble des calculs est réalisé en retenant la classe de service 3 selon l'Eurocode 5 (NF EN 1995-1-1).

## 8 Calculs effectués et résultats

### 8.1 Introduction sur la démarche suivie

De manière classique, usuelle, le dimensionnement de ce type d'ouvrage s'effectue sur la base d'un modèle filaire (modèle « barres ») dans lequel les liaisons (assemblages) entre les barres (pièces) sont représentées par des articulations (rotules).

Cette hypothèse est vérifiée immédiatement lorsque l'assemblage considéré est composé d'un seul boulon par exemple (aucune reprise de moment possible). En revanche lorsque l'assemblage possède au moins deux assembleurs, il existe une rigidité rotationnelle qui, selon sa valeur, peut rendre cette hypothèse fautive et potentiellement dommageable pour le dimensionnement. En effet, la raideur des liaisons va modifier le schéma de répartition des efforts au sein des barres et éventuellement modifier les résultats du dimensionnement.

La notion « d'assemblages semi-rigides », situés entre l'articulation et l'encastrement, a été introduite par l'Eurocode 5. On peut y trouver notamment les éléments suivants :

- La partie générale de l'Eurocode 5 (NF EN 1995-1-1 et amendements) mentionne au §5.1 :
  - (4)P Le modèle servant au calcul des efforts internes dans la structure ou dans une partie de celle-ci doit prendre en compte les effets des déformations des assemblages.
  - (5) En général, il convient de considérer l'influence des déformations dans les assemblages au travers de leur rigidité (en rotation ou en translation par exemple) ...]

Notes :

Le P derrière la clause (4) veut dire qu'il s'agit d'un « Principe » et que son application est obligatoire pour respecter le texte.

La clause (5) en revanche n'est pas un Principe, elle est « informative ».

- De plus, l'annexe nationale française de l'Eurocode (NF EN 1995-1-1/NA) complète cette clause (4) du §5.1 :
  - Une liaison peut être considérée comme encadrée si  $\beta \geq 8$  ou **articulée si  $\beta \leq 0,5$**  avec :

$$\beta = \frac{K_w}{E \frac{I}{L}}$$

Où  $K_w$  est la rigidité en rotation, E le module d'élasticité de la pièce concernée, L la longueur mise en jeu (entre deux liaisons) de la pièce concernée et I l'inertie de flexion au 1/3 de L à partir de la liaison considérée.

La démarche suivie dans cette étude est premièrement basée sur la prise en compte, le cas échéant, de cette semi-rigidité des liaisons, lorsque la condition sur le coefficient  $\beta$  est vérifiée. Le chapitre suivant résume la méthodologie globale suivie.

### 8.2 Méthodologie de calcul suivie

Dans un souci de se conformer aux règles de calcul actuellement en vigueur et de rendre compte également des habitudes de calcul, la démarche suivie dans l'étude peut se résumer comme suit :

1. Modélisation de la ferme en structure barres entièrement articulée
2. Vérification des sections des pièces conformément à l'Eurocode à l'ELU et à l'ELS
3. Conception/définition des différents assemblages pour « passer les différents efforts »
  - a. Définition de l'assemblage sous le logiciel ACORD
  - b. Validation de l'assembleur (ici boulon) et du nombre (ici 1, 2 ou 4)
  - c. Relevé des paramètres de raideurs axiales et rotationnelles et du coefficient de rigidité ( $\beta$ )
4. Injection des raideurs dans les liaisons du modèle initial et nouveau calcul
5. Vérification des sections des pièces conformément à l'Eurocode à l'ELU et à l'ELS
6. Vérification des déformées majeures éventuelles
7. Vérification des taux de travail des assemblages à l'ELU

L'objectif de l'étude est de quantifier l'impact que pourrait avoir les affaiblissements de raideur et de résistance liés aux assemblages drainants sur le dimensionnement global de la structure. Les étapes 1 à 7 peuvent représenter un calcul classique actuel dans l'esprit des Eurocodes Les étapes suivantes (8 à 13) sont donc rajoutées aux précédentes :

8. Comparaison des taux de travail ELU des assemblages à « l'exigence COBEI » : maxi = 67%
9. Calcul des raideurs dégradées par rapport aux préconisations rappelées au chapitre 6
10. Injection des raideurs dégradées dans les liaisons du modèle précédent et nouveau calcul
11. Vérification des sections des pièces conformément à l'Eurocode à l'ELU et à l'ELS
12. Vérification des déformées majeures éventuelles
13. Vérification des taux de travail ELU des assemblages à « l'exigence COBEI » : maxi = 67%

Les 13 étapes décrites ci-dessus sont celles qui ont été suivies pour le cas spécifique de la ferme de loggia présentée précédemment.

Pour rappel la vérification selon les Eurocodes est dite aux Etats Limites, avec l'Etat Limite Ultime (ELU ⇔ résistance/contrainte) et l'Etat Limite de Service (ELS ⇔ déplacements/déformations).

### 8.3 Préambule aux résultats – Synthèse des étapes 1 à 3

Comme explicité ci-dessus, l'étude d'impact sur le dimensionnement réside essentiellement sur la raideur des assemblages et sur sa prise en compte. La première partie de l'étude consiste donc à mener à bien les étapes 1 à 3 permettant de définir les assemblages dans le cadre d'un premier calcul, potentiellement « grossier », impliquant des articulations à chaque liaison.

L'ensemble des nœuds de liaisons de la ferme de loggia n'offre pas de grande souplesse pour positionner les boulons d'assemblage. En effet, pour pouvoir effectuer un calcul d'assemblage conforme aux règles de l'Eurocode 5, des distances entre organes d'assemblage ainsi que des distances aux bords et extrémités des éléments bois sont à respecter (distances directement fonctions du diamètre de l'organe d'assemblage).

Les deux figures ci-dessous, extraites du logiciel ACORD, permettent d'imager pour les assemblages moisés poteau/arbaletrier et entrain/arbaletrier les surfaces possibles de positionnement des boulons en fonction de ces différentes exigences à respecter (les ellipses en pointillés sont les distances entre organes minimales, les traits pointillés bleus sont les distances aux bords et extrémités).

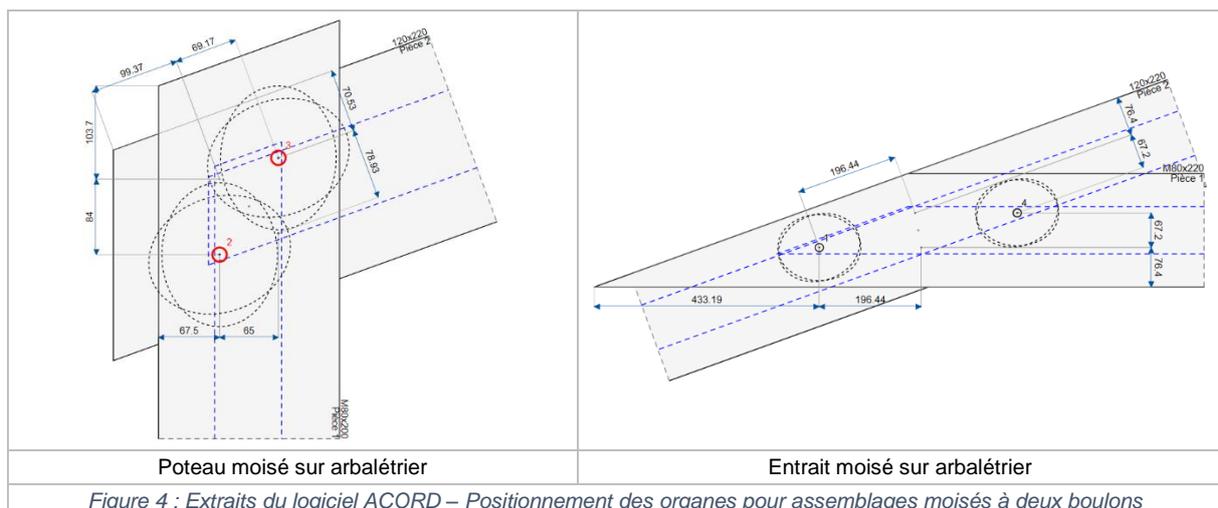


Figure 4 : Extrait du logiciel ACORD – Positionnement des organes pour assemblages moisés à deux boulons

Hormis les assemblages poteau/lien et entrain/lien réalisables avec un seul boulon, l'ensemble des autres assemblages en nécessite au moins deux pour permettre de reprendre les efforts constatés.

Dans un souci d'uniformité entre les assemblages et pour satisfaire aux différentes exigences évoquées, le choix s'est porté sur des boulons M16.

Le tableau ci-dessous résume et synthétise les résultats obtenus pour la première itération de calcul sur la ferme « entièrement articulée » (pour rappel, en régions de vent 2, et de neige A2 altitude < 200 m).

| Assemblage                | Type                      | Assembleur    | Taux de travail max | Relevé des informations raideurs |                |                |                      |
|---------------------------|---------------------------|---------------|---------------------|----------------------------------|----------------|----------------|----------------------|
|                           |                           |               |                     | $\beta$                          | $K_x$ (kN/m)   | $K_z$ (kN/m)   | $K\theta$ (kN.m/rad) |
| Poteau / Arbalétrier      | Poteau moisé              | 2 boulons M16 | 43%                 | 0,03                             | 23951,1        | 23951,1        | 94,71                |
| Entrait / Arbalétrier     | Entrait moisé             | 2 boulons M16 | 62%                 | <b>0,8</b>                       | <b>23951,1</b> | <b>23951,1</b> | <b>896,4</b>         |
| Poteau / Lien             | Poteau moisé              | 1 boulon M16  | 67%                 | 0                                | 11975,6        | 11975,6        | 0                    |
| Entrait / Lien            | Entrait moisé             | 1 boulon M16  | 66%                 | 0                                | 11975,6        | 11975,6        | 0                    |
| Arbalétrier / Poinçon     | Plaque en âme Arbalétrier | 2 boulons M16 | 60%                 | 0,08                             | 47902,3        | 47902,3        | 119,76               |
| Contrefiche / Arbalétrier | Plaque en âme Contrefiche | 2 boulons M16 | 39%                 | 0,35                             | 47902,3        | 47902,3        | 119,76               |
| Contrefiche / Poinçon     | Plaque en âme Contrefiche | 2 boulons M16 | 39%                 | 0,35                             | 47902,3        | 47902,3        | 119,76               |
| Pied de poteau            |                           |               |                     |                                  |                |                |                      |

*Tableau 13 : Informations concernant les rigidités des différents assemblages envisagés*

La première itération de calcul permet de constater que parmi les assemblages réalisés, un seul possède une valeur  $\beta > 0,5$  (liaisons entrain/arbalétrier) et implique une deuxième itération (Etape 4) pour prendre en compte cette « semi-rigidité » d'assemblage.

La ligne concernant le pied de poteau n'est pas remplie de façon intentionnelle. Cet assemblage est spécifique dans la mesure où c'est celui qui offre le plus de variation possible pour positionner les boulons.

Cette variabilité possible de solutions est directement impactante pour l'approche retenue. En effet, selon le nombre de boulons et la distance qui les sépare, les paramètres de rigidité de l'assemblage diffèrent, de même que l'hypothèse à retenir pour la modélisation de liaison qui en découle.

Le tableau suivant synthétise les différents cas envisagés et les paramètres de rigidités qui en résultent avec :

- **n**, le nombre de boulons,
- **d1**, la distance entre deux boulons sur une même file (dans le sens du fil du bois)
- **d2**, la distance entre deux files de boulons (perpendiculaire au fil du bois)
- **xc**, la distance entre l'extrémité de la pièce et le centre de l'assemblage

| Boulons | n | d1 (mm) | d2 (mm) | xc (mm) | $K_x = K_z$ (kN/m) | $K\theta$ (kN.m/rad) | $\beta$ [EC5 - 5.1(4)] | Liaison pour modèle |
|---------|---|---------|---------|---------|--------------------|----------------------|------------------------|---------------------|
| M16     | 2 | 100     | -       | 170     | 47902,3            | 119,8                | 0,2                    | articulée           |
| M16     | 2 | 150     | -       | 190     | 47902,3            | 269,5                | 0,42                   | articulée           |
| M16     | 2 | 200     | -       | 220     | 47902,3            | 479                  | <b>0,75</b>            | <b>semi-rigide</b>  |
| M16     | 4 | 100     | 65      | 170     | 95804,5            | 340,7                | <b>0,53</b>            | <b>semi-rigide</b>  |
| M16     | 4 | 150     | 65      | 190     | 95804,5            | 640,1                | <b>1</b>               | <b>semi-rigide</b>  |
| M16     | 4 | 200     | 65      | 220     | 95804,5            | 1059,2               | <b>1,65</b>            | <b>semi-rigide</b>  |

*Tableau 14 : Variantes de solutions en pied de poteau et impact sur les rigidités*

Ces différentes solutions d'assemblage en pied de poteau ont alors été modélisées pour une première étude de sensibilité à ce niveau. Ainsi l'étape 4 a été réalisée à 4 reprises en considérant les deux cas extrêmes des solutions à 2 et 4 boulons. Dans les deux cas, la solution avec d1 minimale (100 mm) est notée V1 et celle avec d1 maximale (200 mm) est notée V3.

Cela paraît évident, notons néanmoins que plus les boulons sont espacés dans le sens du fil du bois (d1) plus la rigidité rotationnelle ( $K\theta$ ) est élevée et moins l'hypothèse d'une articulation est justifiée.

## 8.4 Résultats obtenus

Sur la base des éléments explicités au §8.3, les dénominations ci-dessous sont introduites pour différencier les résultats des différents cas de calculs présentés par la suite :

- **Ferme 2** : modèle de ferme en région de vent 2, avec assemblages drainants à chaque liaison
- **100% rotules** : toutes les liaisons du modèle sont des articulations
- **Kser /  $\beta > 0,5$  xxx** :
  - A. les liaisons du modèle sont des articulations sauf si le paramètre  $\beta$  est  $> 0,5$ , auquel cas les rigidités du Tableau 13 sont injectées dans le modèle
  - B. **xxx** : le complément sur la dénomination correspond à la solution considérée en pied de poteau (2 ou 4 boulons M16) et la version (V1 ou V3) qui correspond aux cas extrêmes du Tableau 14
- **yyy dégradée COBEI** : les raideurs de la solution **yyy** ont été dégradées de 20% conformément aux prescriptions du guide COBEI pour les assemblages boulonnés  
Deux solutions seulement ont été modélisées dans cet esprit, une avec 2 boulons en pied de poteau et l'autre avec 4
- **Kser « totale » 2 M16 - V3** : l'ensemble des liaisons a été modélisé avec les raideurs du Tableau 13 y compris lorsque le coefficient  $\beta$  est  $< 0,5$ . Seule la solution avec 2 boulons version V3, en pied de poteau, a été calculée
- **Kser « totale » 2 M16 - V3 dégradée COBEI** : la solution précédente a été calculée en appliquant la dégradation de 20% sur les raideurs pour chacune des liaisons

Le tableau suivant illustre les résultats obtenus pour les étapes 1 à 3, avec le modèle entièrement articulé.

|  |                            |               | 100% rotules |              |
|--|----------------------------|---------------|--------------|--------------|
|  |                            |               | 1            |              |
| PIECES                                   |                            |               | Repères      | Taux max ELU |
| entrait                                  |                            |               | a            | 67%          |
| arba                                     |                            |               | b            | 50%          |
| poinçon                                  |                            |               | c            | 24%          |
| contrefiche                              |                            |               | d            | 6%           |
| lien                                     |                            |               | e            | 6%           |
| poteau                                   |                            |               | f            | 36%          |
| Pièces                                   |                            |               | Repère       | Taux max ELS |
| entrait                                  |                            |               | g            | 6%           |
| arba                                     |                            |               | h            | 29%          |
| poinçon                                  |                            |               | i            | 6%           |
| contrefiche                              |                            |               | j            | 0%           |
| lien                                     |                            |               | k            | 0%           |
| poteau                                   |                            |               | l            | 24%          |
| Déplacement final en tête de poteau      |                            |               | m            | 68%          |
| Déplacement instantané en tête de poteau |                            |               | n            | 73%          |
| ASSEMBLAGES                              |                            |               | Repère       | Taux max ELU |
| Assemblage                               | Type                       | Assembleur    |              |              |
| Poteau / Arbalétrier                     | Poteau moisé               | 2 boulons M16 | A            | 43%          |
| Entrait / Arbalétrier                    | Entrait moisé              | 2 boulons M16 | B            | 62%          |
| Poteau / Lien                            | Poteau moisé               | 1 boulon M16  | C            | 67%          |
| Entrait / Lien                           | Entrait moisé              | 1 boulon M16  | D            | 66%          |
| Arbalétrier / Poinçon                    | Plaque en âme Arbalétrier  | 2 boulons M16 | E            | 60%          |
| Contrefiche / Arbalétrier                | Plaque en âme Contrefiche  | 2 boulons M16 | F            | 39%          |
| Contrefiche / Poinçon                    | Plaque en âme Contrefiche  | 2 boulons M16 | G            | 39%          |
| Pied de poteau                           | "Poteau moisé sur platine" | 2 M16 - V1    | 2M16-V1      | 39%          |
|  |                            | 2 M16 - V3    | 2M16-V3      | 31%          |
|  |                            | 4 M16 - V1    | 4M16-V1      | 21%          |
|  |                            | 4 M16 - V3    | 4M16-V3      | 16%          |

Tableau 15 : Illustration du tableau de résultats sur le 1<sup>er</sup> cas entièrement articulé : « 100% rotules »

Du haut vers le bas, sont exprimés les résultats sur les éléments bois (Pièces), à l'ELU puis à l'ELS et enfin à l'ELU sur les assemblages. Ce cas particulier « 100% rotules » a été réalisé avec les 4 solutions de pied de poteau (4 dernières lignes). L'ensemble étant articulé, seul le taux de travail à l'ELU sur cet assemblage est modifié car la raideur spécifique à chaque solution n'y est pas encore introduite.

Le tableau global de la page suivante synthétise l'ensemble des résultats, dans cet esprit.

|                    |   | Configurations de : Ferme 2        |                                    |                                    |                                    |  |  |                             |   |     |
|--------------------|---|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--|--|-----------------------------|---|-----|
|                    |   | 1                                  | 2                                  | 3                                  | 4                                  | 5  | 6  | 7                           | 8   | 9   |
|                    |   | Taux max ELU                       |                                    |                                    |                                    |  |  |                             |   |     |
|                    |   | 100% rotules                       |                                    |                                    |                                    |  |  |                             |   |     |
|                    |   | Kser / $\beta > 0,5$<br>2 M16 - V1 | Kser / $\beta > 0,5$<br>2 M16 - V3 | Kser / $\beta > 0,5$<br>4 M16 - V1 | Kser / $\beta > 0,5$<br>4 M16 - V3 | Kser / $\beta > 0,5$<br>2 M16 - V3<br>dégradée COBEI | Kser / $\beta > 0,5$<br>4 M16 - V1<br>dégradée COBEI | Kser "totale"<br>2 M16 - V3 | Kser "totale"<br>2 M16 - V3<br>dégradée COBEI |     |
| <b>PIECES</b>      |   | <b>Repères</b>                     |                                    |                                    |                                    |  |  |                             |   |     |
|                    | entrait                                   | 67%                                | 59%                                | 57%                                | 58%                                | 56%  | 56%  | 56%                         | 54%   | 52% |
|                    | arba                                      | 50%                                | 42%                                | 41%                                | 41%                                | 40%  | 41%  | 41%                         | 42%   | 43% |
|                    | poignon                                   | 24%                                | 25%                                | 23%                                | 24%                                | 23%  | 24%  | 24%                         | 20%   | 19% |
|                    | contrefiche                               | 6%                                 | 5%                                 | 5%                                 | 5%                                 | 5%   | 5%   | 5%                          | 5%  | 5%  |
|                    | lien                                      | 6%                                 | 7%                                 | 6%                                 | 6%                                 | 5%   | 6%   | 6%                          | 4%  | 4%  |
|                    | potreau                                   | 36%                                | 38%                                | 29%                                | 30%                                | 28%  | 30%  | 31%                         | 26%   | 26% |
| <b>Pièces</b>      |   | <b>Taux max ELS</b>                |                                    |                                    |                                    |  |  |                             |   |     |
|                    | entrait                                   | 6%                                 | 16%                                | 15%                                | 16%                                | 15%  | 18%  | 18%                         | 19%   | 22% |
|                    | arba                                      | 29%                                | 29%                                | 25%                                | 26%                                | 25%  | 27%  | 27%                         | 29%   | 31% |
|                    | poignon                                   | 6%                                 | 6%                                 | 6%                                 | 6%                                 | 6%   | 6%   | 6%                          | 5%  | 5%  |
|                    | contrefiche                               | 0%                                 | 0%                                 | 0%                                 | 0%                                 | 0%   | 0%   | 0%                          | 1%  | 1%  |
|                    | lien                                      | 0%                                 | 0%                                 | 0%                                 | 0%                                 | 0%   | 0%   | 0%                          | 0%  | 0%  |
|                    | potreau                                   | 24%                                | 26%                                | 17%                                | 18%                                | 14%  | 18%  | 19%                         | 13%   | 14% |
|                    | Déplacement final entête de potreau       | 68%                                | 73%                                | 47%                                | 51%                                | 37%  | 50%  | 54%                         | 65%   | 75% |
|                    | Déplacement instantané en tête de potreau | 73%                                | 85%                                | 58%                                | 62%                                | 48%  | 63%  | 67%                         | 77%   | 89% |
| <b>ASSEMBLAGES</b> |   | <b>Taux max ELU</b>                |                                    |                                    |                                    |  |  |                             |   |     |
|                    | <b>Assemblage</b>                         | <b>Repère</b>                      |                                    |                                    |                                    |  |  |                             |   |     |
|                    | <b>Type</b>                               | <b>Assembleur</b>                  |                                    |                                    |                                    |  |  |                             |   |     |
|                    | Potreau / Arbalétrier                     | 43%                                | 41%                                | 38%                                | 39%                                | 36%  | 38%  | 39%                         | 47%   | 46% |
|                    | Entrait / Arbalétrier                     | 62%                                | 64%                                | 61%                                | 62%                                | 60%  | 59%  | 59%                         | 57%   | 54% |
|                    | Potreau / Lien                            | 67%                                | 71%                                | 60%                                | 62%                                | 57%  | 62%  | 64%                         | 47%   | 47% |
|                    | Entrait / Lien                            | 66%                                | 71%                                | 60%                                | 61%                                | 57%  | 61%  | 63%                         | 46%   | 46% |
|                    | Arbalétrier / Poignon                     | 60%                                | 41%                                | 40%                                | 40%                                | 39%  | 40%  | 40%                         | 45%   | 46% |
|                    | Contrefiche / Arbalétrier                 | 39%                                | 32%                                | 31%                                | 31%                                | 30%  | 30%  | 30%                         | 25%   | 24% |
|                    | Contrefiche / Poignon                     | 39%                                | 32%                                | 31%                                | 31%                                | 30%  | 30%  | 31%                         | 26%   | 25% |
|                    | Pied de potreau                           | 31%                                | 51%                                | x                                  | x                                  | x  | x  | x                           | x   | x   |
|                    | "Potreau moisé sur platine"               | 21%                                | x                                  | x                                  | 33%                                | x  | x  | 30%                         | x   | x   |
|                    |   | 16%                                | x                                  | x                                  | x                                  | 34%  | x  | x                           | x   | x   |

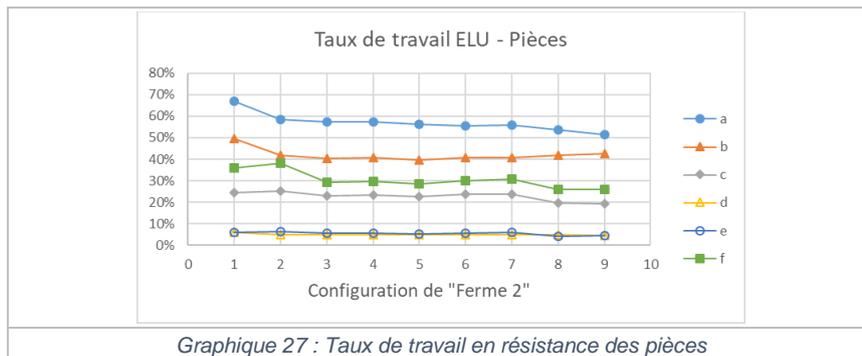
Tableau 16 : Résultats des différents cas de modélisation effectués sur la configuration « Ferme 2 »

Dans un souci de simplification des légendes d'une représentation graphique des résultats, le tableau ci-dessus mentionne des « Repères ». Ils sont rappelés ici :

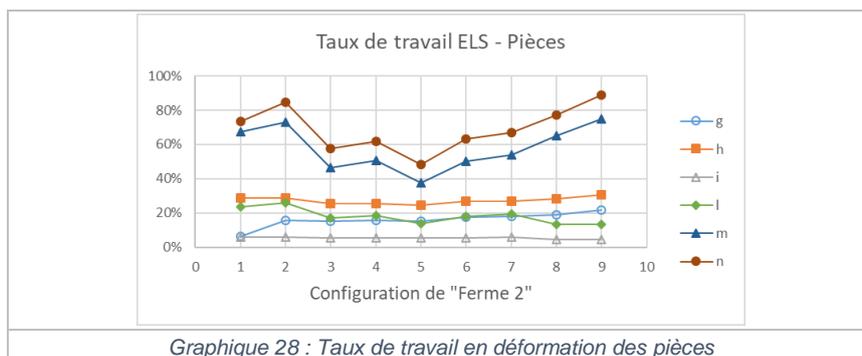
- de **1 à 9** : les différents cas de fermes modélisés, explicités au début du §8.4.
  1. ferme 100% articulée
  2. ferme avec raideurs uniquement pour les liaisons avec  $\beta > 0,5$  ; solution avec 2 boulons M16 en pied de poteau, variante 1
  3. ferme avec raideurs uniquement pour les liaisons avec  $\beta > 0,5$  ; solution avec 2 boulons M16 en pied de poteau, variante 3
  4. ferme avec raideurs uniquement pour les liaisons avec  $\beta > 0,5$  ; solution avec 4 boulons M16 en pied de poteau, variante 1
  5. ferme avec raideurs uniquement pour les liaisons avec  $\beta > 0,5$  ; solution avec 4 boulons M16 en pied de poteau, variante 3
  6. ferme avec raideurs uniquement pour les liaisons avec  $\beta > 0,5$  ; solution avec 2 boulons M16 en pied de poteau, variante 3 ; les raideurs injectées sont dégradées de 20% selon guide COBEI
  7. ferme avec raideurs uniquement pour les liaisons avec  $\beta > 0,5$  ; solution avec 4 boulons M16 en pied de poteau, variante 1 ; les raideurs injectées sont dégradées de 20% selon guide COBEI
  8. ferme avec raideurs pour l'ensemble des liaisons, quelle que soit la valeur de  $\beta$  ; solution avec 2 boulons M16 en pied de poteau, variante 3
  9. ferme avec raideurs pour l'ensemble des liaisons, quelle que soit la valeur de  $\beta$  ; solution avec 2 boulons M16 en pied de poteau, variante 3 ; les raideurs injectées sont dégradées de 20% selon guide COBEI
  
- de **a à f** : représente l'identification des éléments bois pour leur vérification à l'ELU
  - a. entrain
  - b. arbalétrier
  - c. poinçon
  - d. contrefiche
  - e. lien
  - f. poteau
  
- de **g à n** : représente l'identification des éléments bois pour leur vérification à l'ELS
  - g. entrain
  - h. arbalétrier
  - i. poinçon
  - j. contrefiche
  - k. lien
  - l. poteau
  - m. déplacement maximal en tête de poteau (instantanée)
  - n. déplacement maximal final en tête de poteau (fluage compris)
  
- de **A à G** : représente l'identification des assemblages pour leur vérification à l'ELU, excepté les pieds de poteau
  - A. Poteau moisé sur arbalétrier (2 boulons M16)
  - B. Entrain moisé sur arbalétrier (2 boulons M16)
  - C. Poteau moisé sur lien (1 boulon M16)
  - D. Entrain moisé sur lien (1 boulon M16)
  - E. Arbalétrier / poinçon (plaque en âme de l'arbalétrier + 2 boulons M16)
  - F. Contrefiche / arbalétrier (plaque âme de la contrefiche + 2 boulons M16)
  - G. Contrefiche / poinçon (plaque âme de la contrefiche + 2 boulons M16)

- Les 4 dernières lignes représentent les différentes solutions modélisées en pied de poteau (poteau moisé sur platine spécifique)
  - 2 M16 – V1 : 1 file de 2 boulons M16 espacés de 100 mm
  - 2 M16 – V3 : 1 file de 2 boulons M16 espacés de 200 mm
  - 4 M16 – V1 : 2 files, espacées de 65 mm, de 2 boulons M16 espacés de 100 mm
  - 4 M16 –V3 : 2 files, espacées de 65 mm, de 2 boulons M16 espacés de 200 mm

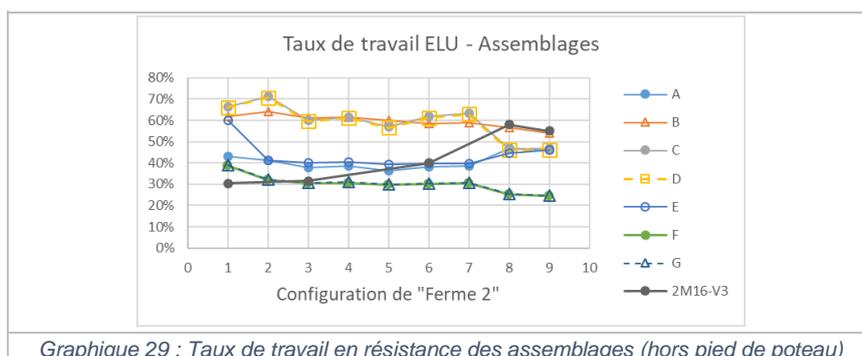
Les graphiques suivants illustrent les résultats du Tableau 16 précédent avec les dénominations explicitées ci-dessus, pour les 9 cas de modélisation de la « ferme 2 ».



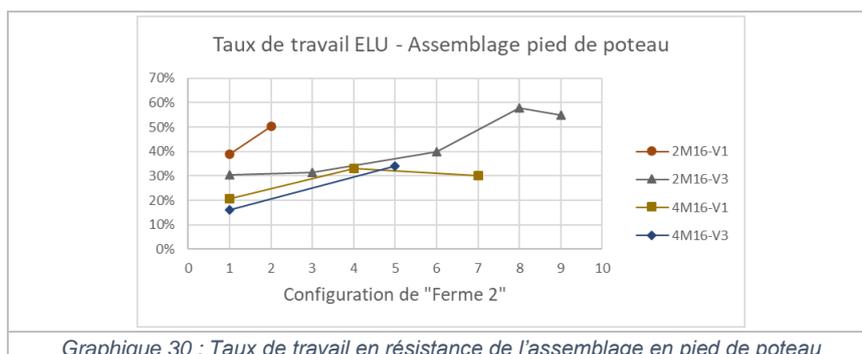
Graphique 27 : Taux de travail en résistance des pièces



Graphique 28 : Taux de travail en déformation des pièces



Graphique 29 : Taux de travail en résistance des assemblages (hors pied de poteau)



Graphique 30 : Taux de travail en résistance de l'assemblage en pied de poteau

## 8.5 Analyse des résultats

Les résultats du Tableau 16, imagés par les 4 graphiques ci-dessus conduisent premièrement aux constats et analyses suivants, d'un point de vue général :

- La modélisation N°1, entièrement articulée, conduit à des taux de travail en résistance au maximum de 67% pour les pièces. Les éléments de la ferme sont globalement surdimensionnés, ce qui est courant pour de tels ouvrages où la massivité de la pièce comporte également des dimensions de ressenti et d'esthétique. Le taux de travail en déformation le plus élevé se situe au niveau du mouvement en tête de poteau, de 73%. Au niveau des assemblages, les taux de travail maximum en résistance sont de 66% et 67% au niveau des deux liaisons des liens avec entrait et poteau. Cela sous-entend un taux de travail en résistance de 100% pour un assemblage drainant.
- Les différentes modélisations N°2 à N°9 montrent un impact très léger sur les taux de travail en résistance des pièces. La tendance est au maintien des taux, voire à une légère diminution.
- Globalement, pour les modélisations N°2 à N°9, les taux de travail en déformation sont soit maintenus soit en légère hausse. La seule exception est la déformation en tête de poteau, à la fois très sensible à la rigidité en pied de poteau (impact direct logique) mais également aux autres rigidités de l'ouvrage.
- La modélisation N°2 conduit à des taux de travail en résistance dans les assemblages supérieurs à 67% soit supérieurs à 100% pour les assemblages drainants. Le dépassement reste faible, de l'ordre de 4%. Cela permet néanmoins de constater qu'en modifiant seulement la rigidité de l'assemblage entrait/arbaletrier ( $\beta = 0,8 > 0,5$ ) dans la modélisation, les taux de travail des assemblages sont modifiés par rapport à la version N°1 (100% articulée). Certains augmentent (jusqu'à +12%) et d'autres diminuent (jusqu'à -19%).
- Au final, les différents cas modélisés N°1 à N°5 montrent que la prise en compte de la semi-rigidité des liaisons, en accord avec l'Eurocode 5, modifie le schéma de répartition des efforts dans la structure et peut modifier ainsi les résultats en résistance et déformation (favorablement ou défavorablement) par rapport à une structure entièrement articulée. Les écarts constatés demeurent globalement faibles. L'impact majeur se situant sur une déformation globale de l'ouvrage, en tête de poteau. L'analyse des cas N°1 et N°2 seulement montre à ce niveau que le cas N°1 sous-estime le déplacement en tête de poteau qui passe de 73% à 85% avec le cas N°2. Les cas N°3, N°4 et N°5 sont ensuite plus favorables avec des valeurs inférieures à 73%.

En ce qui concerne une analyse plus spécifique dédiée à la prise en compte des assemblages drainants sur le comportement global de la structure, nous nous intéressons ici seulement aux cas N°3 et N°6 et aux cas N°4 et N°7. Les cas comparés entre eux sont donc la même conception avant et après dégradation de la raideur de 20%.

- Le constat effectué précédemment le taux de travail en résistance des pièces demeure, l'impact est négligeable.
- Il en est de même pour la déformation des pièces, avec l'exception du déplacement en tête de poteau.
- Enfin, les taux de travail en résistance des assemblages varient, positivement ou négativement, de quelques pourcents dans la majorité des cas. Le cas extrême constaté, unique, est une augmentation de 8% du taux de travail en pied de poteau (entre cas N°3 et cas N°6).
- Globalement, pour le cas de ferme considéré, en appliquant une approche de dimensionnement conforme aux règles de calcul actuelles, il apparaît que la prise en compte des rigidités dégradées de 20% pour représenter les assemblages drainants ne génère pas de souci de justification. La vérification demeure à effectuer dans la mesure où chaque cas est particulier, afin de s'assurer notamment que certains effets secondaires (déplacement en tête de poteau par exemple) restent dans les limites acceptables.

Enfin, afin de compléter cette étude de sensibilité sur les rigidités des liaisons, les deux cas spécifiques ajoutés, N°8 et N°9 sont analysés indépendamment. Pour rappel ces deux cas sont modélisés en considérant la raideur effective (théorique) de chaque assemblage, quelle que soit la valeur du coefficient  $\beta$ .

- La quasi-totalité des constats est identique à ceux précédemment effectués.
- La différence majeure qui apparaît avec la dégradation de 20% des rigidités est l'augmentation nettement plus marquée de la déformation en tête de poteau (+12%).

## 9 Conclusion de la projection dans le dimensionnement

Cette partie de l'étude a été lancée à la suite des travaux du guide de Conception des Ouvrages Bois Exposés aux Intempéries (COBEI) qui ont conduit à proposer des coefficients d'affaiblissement de la résistance et de la raideur des assemblages drainants proposés dans ce guide.

Différents cas de calculs ont ainsi été réalisés pour un ouvrage de type « ferme de loggia », ouvrage de charpente représentatif qui comporte 4 assemblages drainants différents. Ce modèle a ainsi servi pour effectuer une forme d'analyse de sensibilité du dimensionnement à la prise en compte des rigidités des liaisons et ensuite à l'affaiblissement de celles-ci.

Globalement, il est apparu que :

- La prise en compte des rigidités d'assemblage dans la modélisation d'un ouvrage de type « ferme » n'est pas sans conséquence sur le résultat final, tant en résistance qu'en déformation. Les niveaux de modification des résultats obtenus dans le cas présent ne conduisent à aucune remise en question de l'ouvrage ou de son dimensionnement.
- Dans tous les cas les éléments bois sont plus ou moins surdimensionnés, relativement classique pour ces ouvrages (taux de travail maximal de 60%).
- Globalement, pour l'ouvrage considéré avec un chargement représentatif d'une bonne partie de la métropole et en considérant les cas de charge les plus dommageables (surfaces ouvertes sur les côtés ⇔ engouffrement du vent ...) les taux de travail des assemblages sont très corrects en situation classique et à la limite en conception drainante (taux de travail classique max = 67%).
- Les modélisations effectuées avec dégradation des rigidités des liaisons boulonnées de 20% (d'après guide COBEI) permettent de constater un impact très faible à la fois sur la résistance et sur la déformation. L'impact le plus important est sur une déformation globale de l'ouvrage, en tête de poteau.
- La prise en compte de la rigidité effective des liaisons est globalement bénéfique pour les taux de travail des assemblages.
- La dégradation de la raideur pour prise en compte des assemblages drainants est relativement « homogène » sur l'ouvrage. Ainsi, l'impact sur les taux de travail est minime.
- La limite est proche d'être atteinte sur l'exemple considéré même si l'on peut constater l'impact du choix retenu pour gérer le pied de poteau. Néanmoins, une augmentation des charges pourrait alors conduire à modifier certains assemblages. Il apparaît alors que les sections des pièces seraient à revoir car les règles de pinces sont quasiment au maximum ici avec des boulons de 16 mm.
- L'approche théorique classique par calcul réalisée dans cette étude ne montre pas de problème particulier avec une conception drainante.

Il reste conseillé de réaliser le dimensionnement en considérant ces rigidités lorsque le coefficient  $\beta > 0,5$ . Le risque majeur de ne pas le faire n'est pas lié à un risque structural, en revanche il est possible d'envisager de dépasser des déformations limites. Pour mémoire, il n'y a pas de « sécurité » sur le calcul des déformations (pas de coefficients de pondération) et un trop grand dépassement d'une limite en déformation peut avoir des conséquences autres qu'esthétiques.

La méthodologie suivie ici, présentée au §8.2, peut être appliquée tout en évitant les étapes inutiles selon le cas dans lequel on se situe. L'approche méthodologique conseillée est alors :

- Ouvrage classique : Etapes 1 à 7
- Ouvrage drainant : Etapes 1 à 3 + Etapes 9 à 13

# Outil technologique reconnu

FCBA et ses équipes d'experts accompagnent les entreprises des filières forêt-bois et ameublement dans l'amélioration de leur compétitivité sur leur marché

L'Institut met à disposition de ces entreprises le savoir-faire de ses ingénieurs et techniciens et la technologie de ses laboratoires, accompagne les professionnels dans la normalisation, l'amélioration de la qualité de leurs produits et les aide à intégrer les innovations technologiques. FCBA diffuse également de l'information scientifique et technique, fruit de son expertise en recherche et développement et veille technologique, économique et documentaire.

## Aide à la conception et à l'innovation

Concevoir et construire avec le bois, respecter les normes et la réglementation. Pour l'ameublement, concevoir par l'usage et proposer des matériaux innovants avec le centre de ressources INNOVATHEQUE.

## R & D

Être le porteur de l'innovation technologique pour permettre le développement des entreprises.

## Centre de formation

Développer votre savoir-faire et vos compétences avec nos formations catalogue ou sur-mesure.

## Bureau de normalisation

Animer et coordonner les travaux de normalisation du bois et des produits dérivés du bois et de l'ameublement.

## Organisme certificateur

Marquage CE/RPC, CTB, NF, OFG, PEFC, FSC...

## Laboratoires à la pointe

Chimie, physique, mécanique, biologie, finition, feu, biosourcés, matériaux...



INSTITUT  
TECHNOLOGIQUE

## Pour nous rejoindre

---

### SIÈGE SOCIAL

10, rue Galilée  
77420 Champs-sur-Mame  
+33 (0)1 72 84 97 84

---

### BORDEAUX

Allée de Boutaut - BP227  
33028 Bordeaux Cedex  
+33 (0)5 56 43 63 00

---

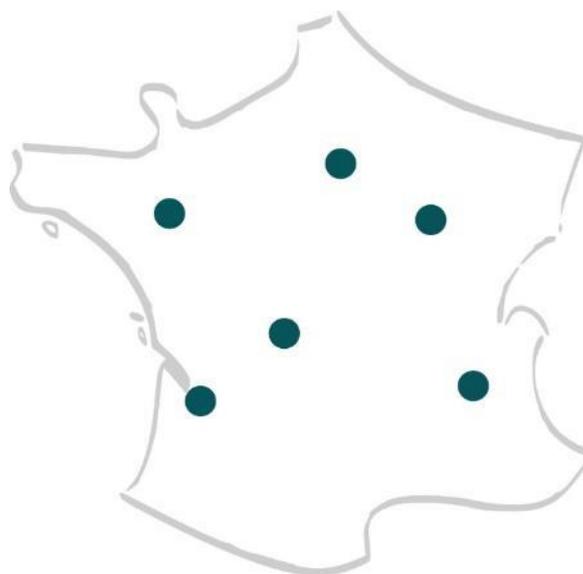
### GRENOBLE

Domaine Universitaire  
CS 90251  
38044 Grenoble Cedex 9  
+33 (0)4 56 85 25 30

---

### CESTAS-PIERROTON

71, route d'Arcachon  
33610 Cestas  
+33 (0)5 56 79 95 00



### NANTES

15, boulevard Léon Bureau  
44200 Nantes  
+33 (0)6 80 34 38 63

---

### CHARREY-SUR-SAÔNE

60, route de Bonnencontre  
21170 Charrey-sur-Saône  
+33 (0)3 80 36 36 20

---

### VERNEUIL-SUR-VIENNE

Domaine des Vaseix  
87430 Verneuil-sur-Vienne  
+33 (0)5 55 48 48 10



[fcba.fr](http://fcba.fr)

---

