

ForestValue

hardwood_joint

WP4 – Tâche 3

Dimensionnement des embrèvements à pas multiple - Essais et modélisation

LERMAB

Dmitry PARELL

Thibault BENISTAND

Annabelle HOSPITAL

2022



Avant-propos

Ce travail s'inscrit dans un projet européen ForestValue : le projet hardwood_joint – innovative joints in hardwoods. Ce projet réunit plusieurs équipes de recherche : l'équipe Timber Structures and Building Construction de l'Institut de technologie de Karlsruhe (Allemagne) qui est le coordinateur du projet, le Department of Building Technology de l'Université de Linnaeus (Suède), l'Institute of Timber Engineering and Wood Technology de l'Université de technologie de Graz (Autriche) et le Laboratoire d'Etude et de Recherche sur le MATériau Bois (LERMAB) de l'Université de Lorraine (France). La finalité du projet est de favoriser la construction de structures à haute performance en bois de feuillus dans le secteur européen du bâtiment, ceci en développant des technologies d'assemblages communes, économiques, fiables et innovantes. Afin d'atteindre cet objectif, des études mécaniques et thermiques sont menées sur trois essences de bois de feuillus : le chêne, le hêtre et le bouleau, ainsi que sur du LVL de hêtre. Ce document présente une partie de la participation française à ce projet et concerne le dimensionnement des assemblages par embrèvement à pas multiple.

L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), l'organisme France Bois Forêt (FBF) et le Comité Professionnel de Développement des Industries Françaises de l'Ameublement et du Bois (CODIFAB) participent au financement de la partie française du projet hardwood_joint. De même, deux industriels français accompagnent ce projet, la société SIMONIN et la société Würth France.

Sommaire

1	Introduction	6
2	Avancements des travaux.....	7
3	Modélisation Cast3M	8
4	Essais de compression	Erreur ! Signet non défini.
5	Conclusion.....	10

1 Introduction

Les essais sont réalisés dans le cadre du projet Forest Value : Hardwood Joint font partie du Work Package 4 ; Task 3. La tâche 3 consiste à caractériser le comportement d'un assemblage par emboîtement multiple. Un Modèle par Éléments Finis a été construit pour simuler cet assemblage de façon paramétrique. Pour déterminer la loi de comportement en compression à entrer dans le modèle, des essais de compression à différents angles par rapport au fil ont été réalisés. Une campagne d'essais sur des emboîtements complets est enfin menée pour valider les prédictions du modèle.

Une première partie rassemble les présentations effectuées en anglais lors des réunions avec les partenaires européens à propos de l'étude des emboîtements à pas multiple.

Une deuxième partie présente l'analyse bibliographique des modélisations possibles pour approcher le comportement de ces assemblages. Cette analyse présente une des voies possibles de modélisation à partir du modèle de Tavakoli. Cette analyse nécessite la caractérisation du bois qui est effectué par compression sur petite éprouvettes ainsi le protocole d'essai ainsi que tous les résultats d'essais sont présentés.

Au regard des premiers essais exploratoires d'assemblages, une autre voie de modélisation a été retenue pour aborder le caractère fragile des assemblages. Ainsi, une troisième partie reprend une présentation du modèle éléments finis réalisé avec le code de calcul Cast3M ainsi que les essais effectués avec du lamellé collé d'Épicéa.

2 Avancements des travaux

ForestValue

hardwood_joint

WP4 – Tâche 3

Dimensionnement des embrèvements à pas multiple - Essais et modélisation

Extraits des présentations effectuées lors des meetings avec l'ensemble des collaborateurs du projet ForestValue hardwood_joint. Les extraits sont en anglais et ne concernent que la partie sur les assemblages par embrèvement à pas multiple.

- Présentation du 24 avril 2019 à Karlsruhe
- Présentation du 10 février 2020 à Graz
- Présentation du 12 octobre 2020 en ligne
- Présentation du 12 avril 2021 en ligne
- Présentation du 27 octobre 2021 à Épinal
- Présentation du 17 mars 2020 en ligne

Harwood joint in LERMAB up to now, Description and organisation of task 4

4 – Modelling deep grooved joints,

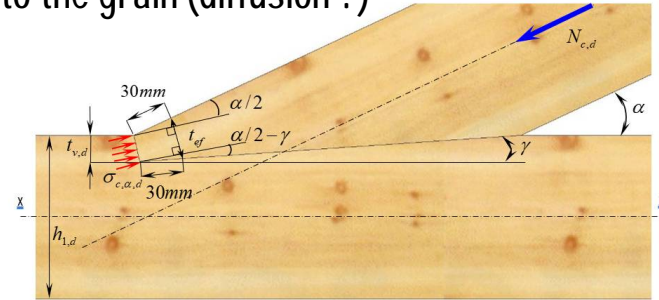
Presentation Jean-François Bocquet



1 – Defining the design problem

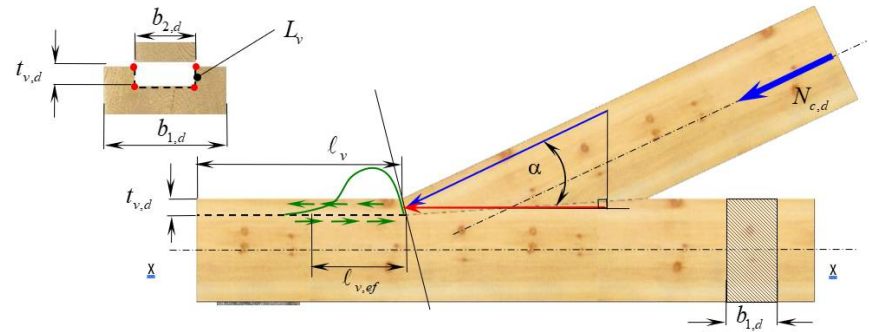
- Compression strength at an angle to the grain (diffusion ?)

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{N_{c,d} \times \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{A_{ef}} \leq k_{c,\alpha} \times f_{c,\alpha/2,d}$$



- Real shear length for usual shear criteria

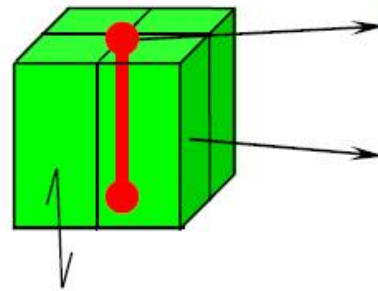
$$\tau_d = \frac{N_{c,d} \times \cos(\alpha)}{L_v \times l_{v,ef}} \leq f_{v,d}$$



- Effect of multiple deep grooves (distribution of the forces on each contacts)



2 – Defining a modelling approach with FEM

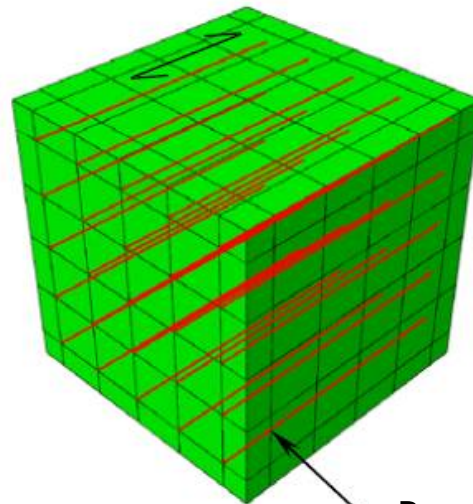


Beam element elasto plastic quadratic 3 nodes
B32 ABAQUS

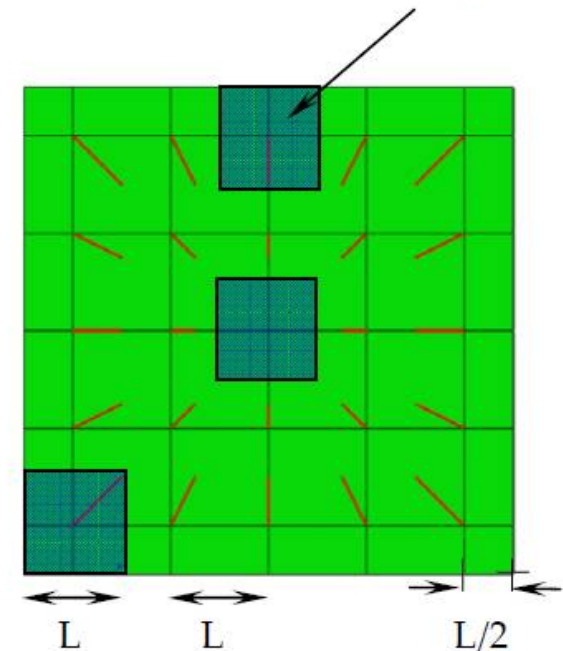
Solid element non linear Crushable Foam
3D 20 nodes C3D20R

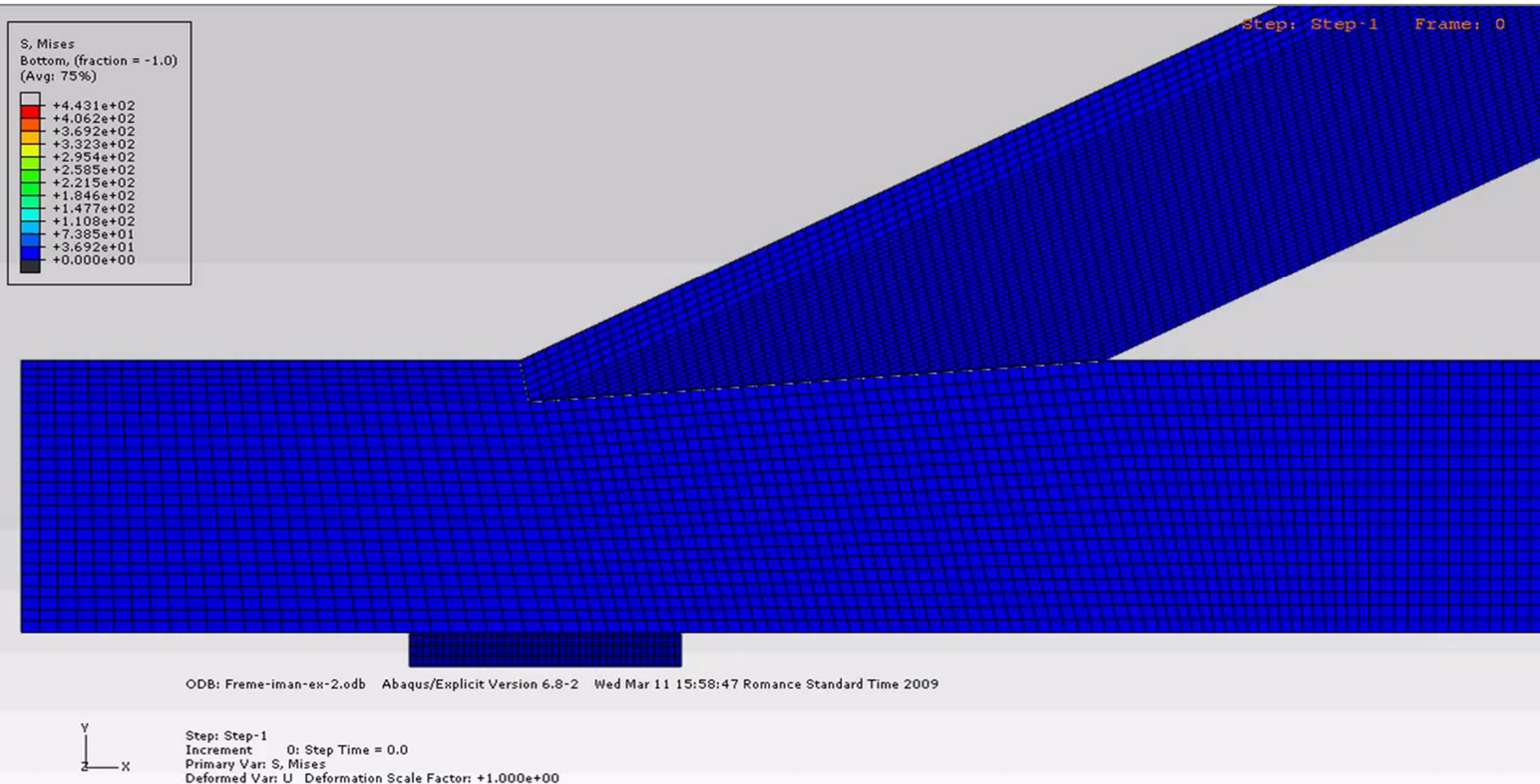
Grain direction

Beam cross section

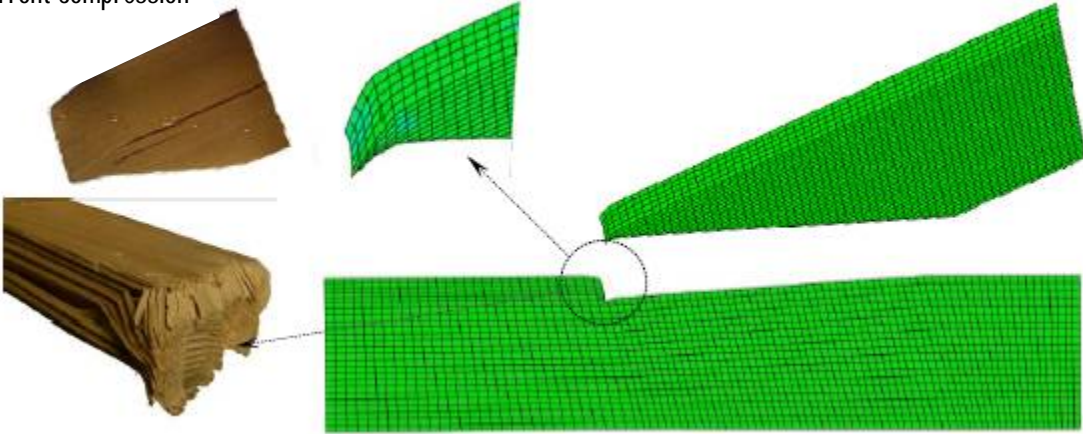


Beam



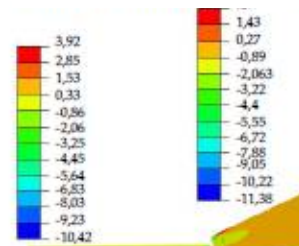


Front compression

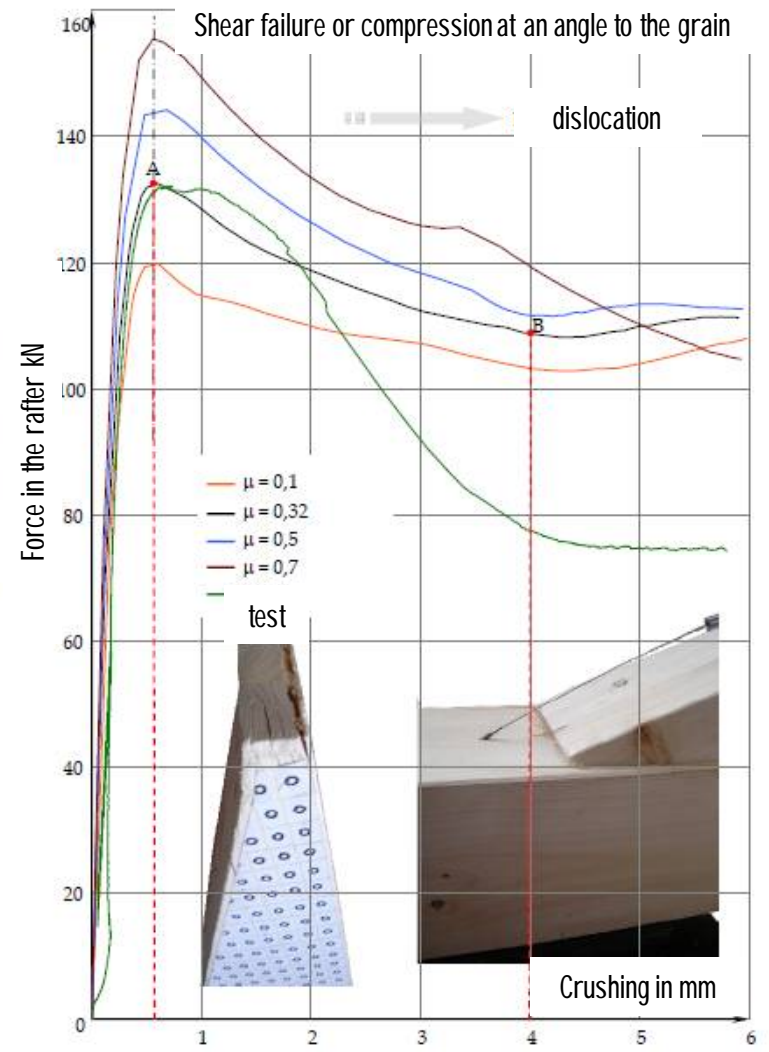
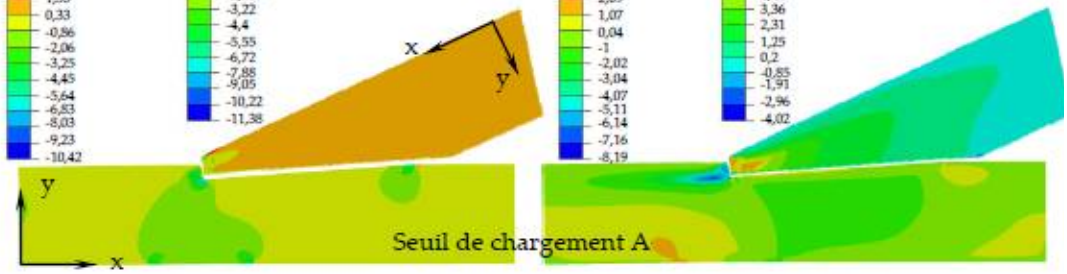
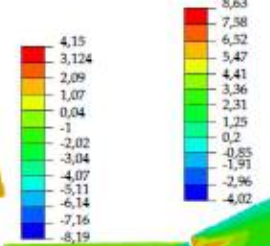


Transverse compression

$\sigma_{c,90}$ (MPa)



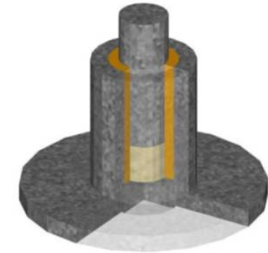
shear τ_{xy} (MPa)



Influence of friction between the surfaces in contact

3 – Task to identify the compression parameters

- Machining cylindrical specimens (CNC lathe)
- Confined compression parallel to the grain
- Confined compression perpendicular to the grain
- Shear and compression interaction (foam model)



4 – Parametric analysis task with ABAQUS

- Defining the current size of this type of joints
- Parametric modelling of joints with ABAQUS
- Parametric analysis of force distribution, shear length and maximum plastic capacity

5 – Experimental tasks

- Analysis the previous results and defining joints to be tested
- Machining and testing the joints for validation (Shear tests see H Blass publication)



EU-Projet ForestValue hardwood_joint

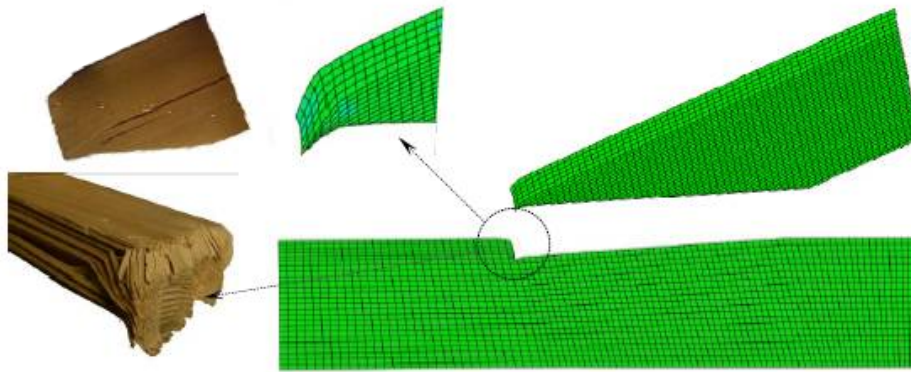
3th meeting | TU Graz | 10 February 2020

5- Multiple Deep grooves – foam-beam model

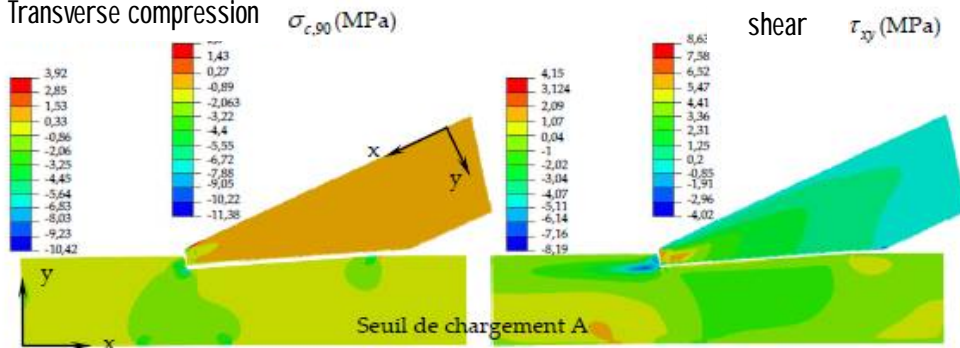
Jean-François BOCQUET

Deep groove timber joints

Front compression

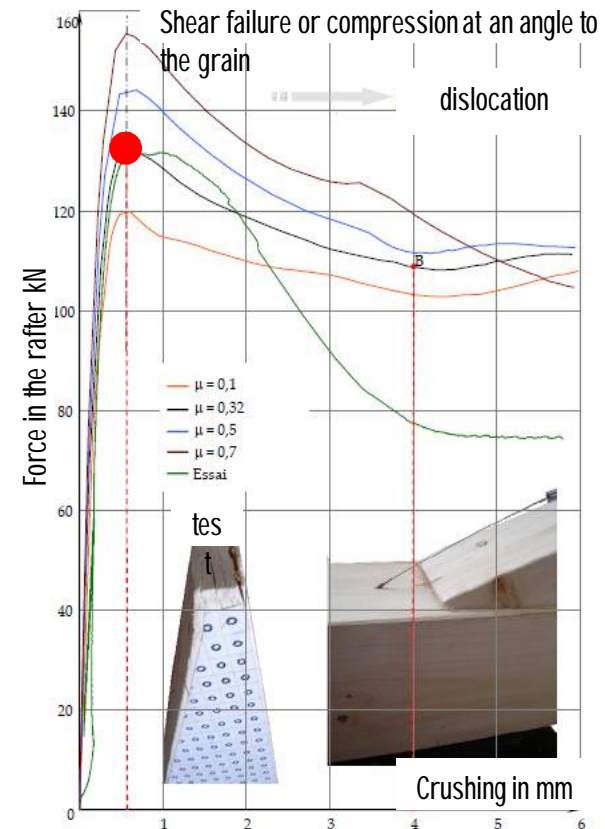


Transverse compression



Compression strength at an angle to the grain

→ Shear and compression interaction for hardwood



MODELLING

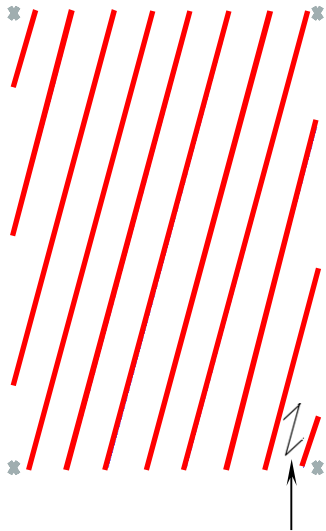
2D modelling deep grooved joints

ABAQUS or Cast3M finite element software

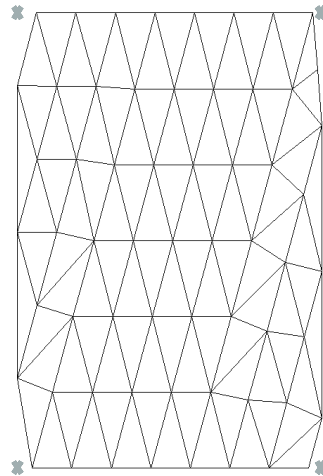
Beam element
elasto plastic

AND

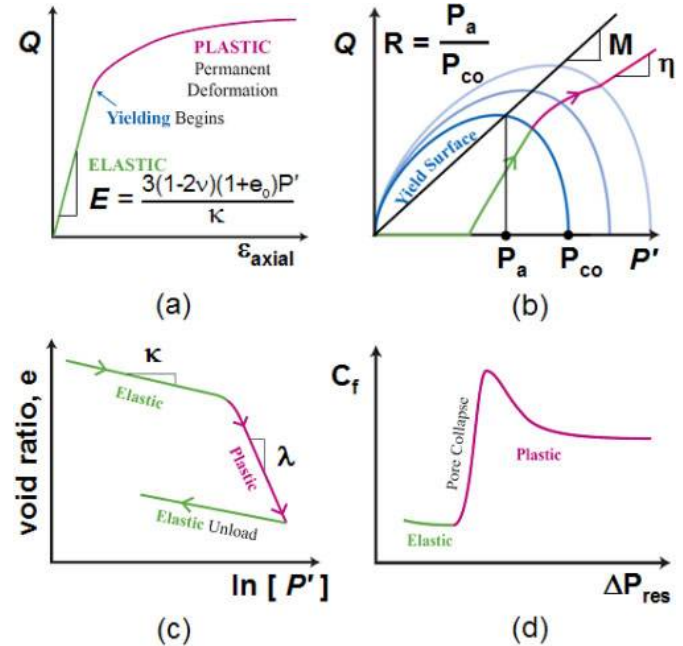
Elements non
linear "Foam"



Grain direction

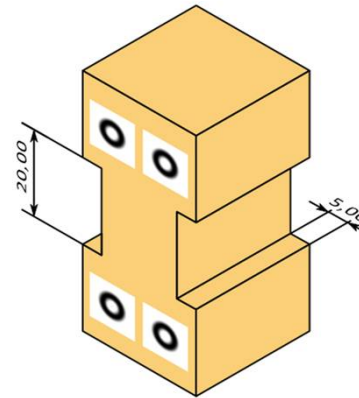
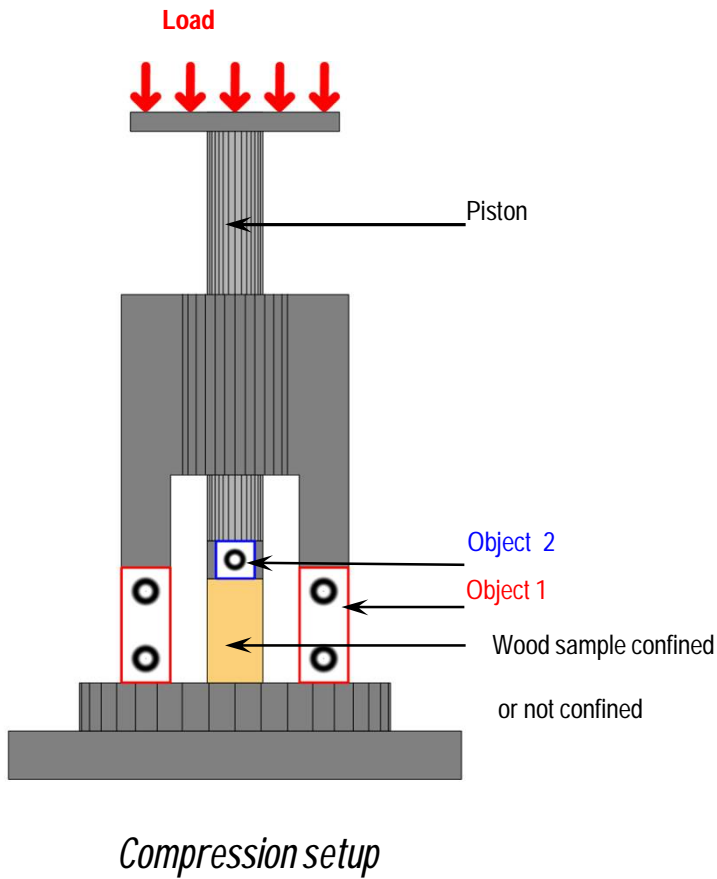


Cast3M

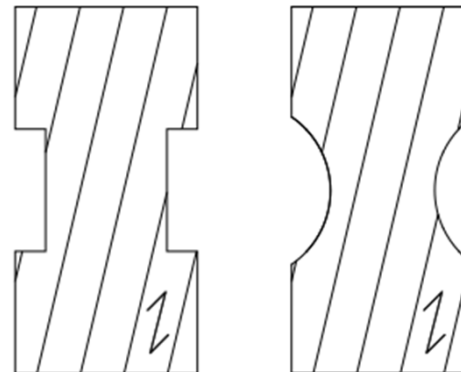


Cam clay elastoplastic constitutive model:
 (a) elastic model;
 (b) yield surface;
 (c) hardening parameter;
 (d) compressibility response.

Identify the compression parameters



Bi-axial shear and compression tests



MODELLING

Planning

- Bibliography almost complete,
- Finish the development about shape and size of the compression sample at an angle to the grain,
(this was not so easy until January due to the reorganisation of ENSTIB workshop).
- Complete the **data base** uniaxial compression at 0° , 90° shear // to grain,
(common work with shallow grooves **but may be also with all the team**)
- Run a complete series of tests,
- Run the model to feed the parameters for CamClay or ABAQUS isotropic foam,
- Program a parametric mesh to model many kinds of big groove joints,
- Study the influence of parameters, prepare final design verifications,
- Perform joint tests to confirm the results (work with partner Simonin),



EU-Projet ForestValue hardwood_joint

4th meeting | Online | 12-13 October 2020

5- MULTIPLE Deep grooves – DESIGN CRITERIA USE OF foam-beam model

Jean-François BOCQUET

Deep groove timber assembly

→ To establish design criteria ==> different strategies

1 - full campaign of tests,

2 – build a model, define all the parameters and compare to a set of tests before to extend the results with the model,

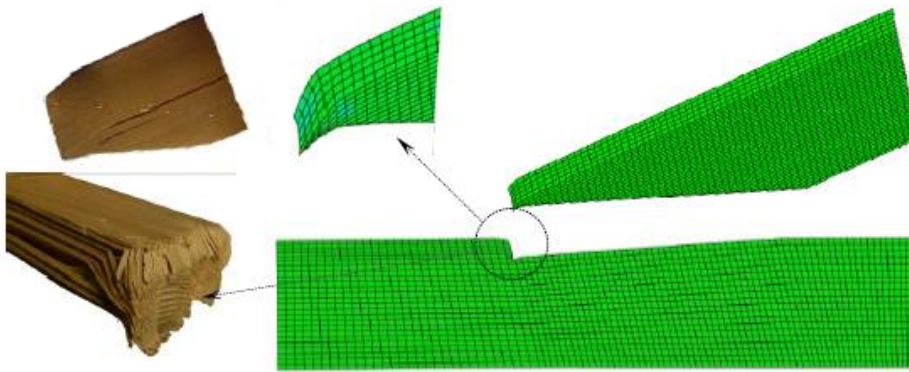
3 – build a simple model, calibrate the model on elementary tests, build a global model* for the problem compare to a set of tests before to extend the results with the model

* *better build a parametric model*

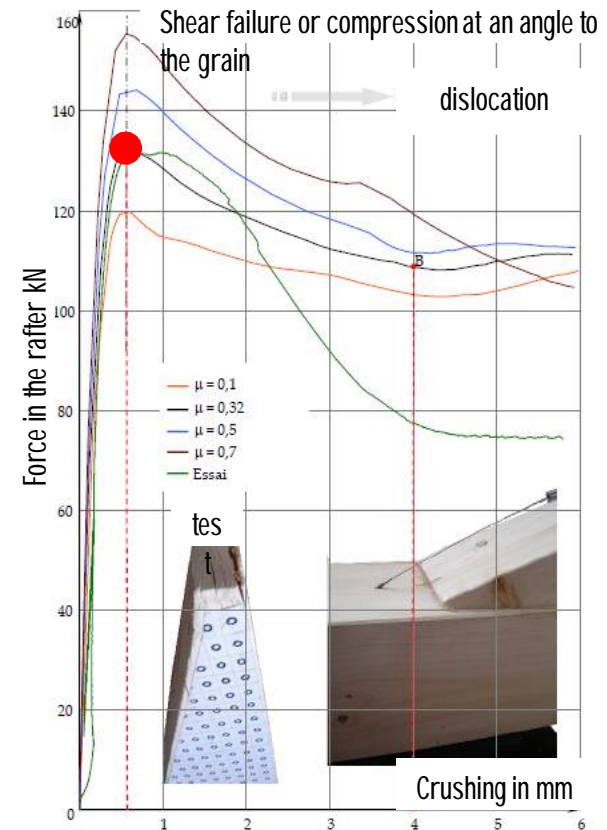
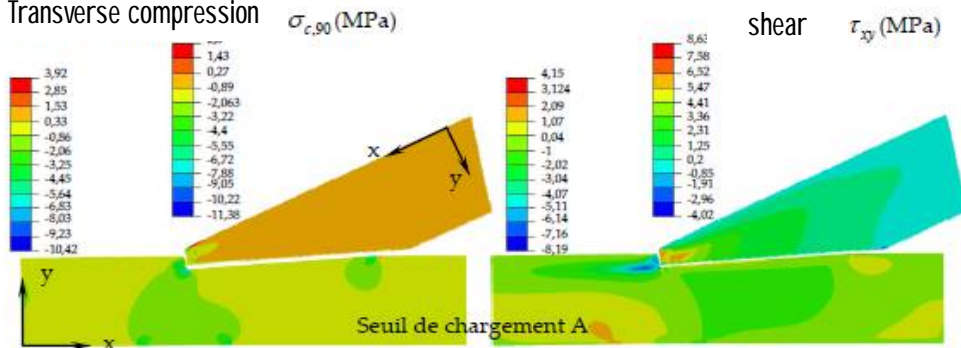
Deep groove timber assembly

MEF Approach

Front compression



Transverse compression

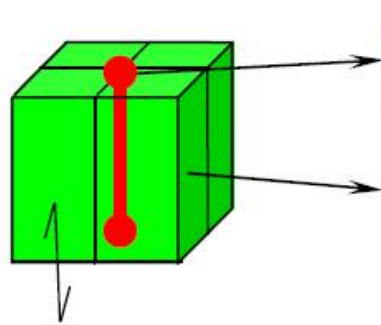


Iman TAVAKOLI PHD Thesis

" Three-dimensional Modeling of Structural Assemblies Thin Folded Sheet Metal by the Finite Element Method "

Deep groove timber assembly

foam beam 2D or 3D modelling

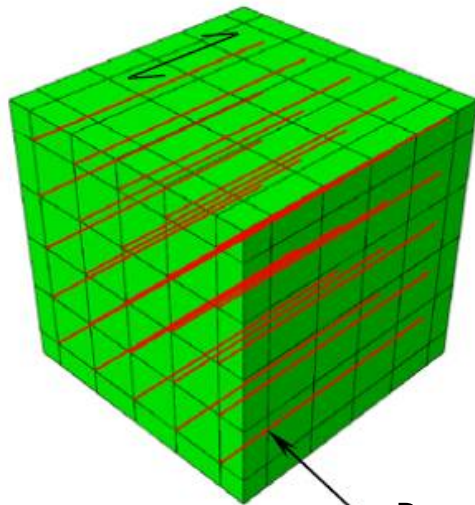


Beam element elasto plastic quadratic 3 nodes
B32 (Abaqus)

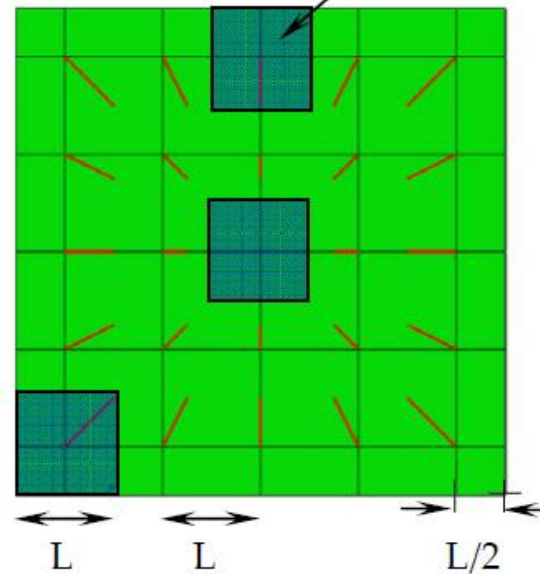
Solid element non linear Crushable Foam
3D 20 nodes C3D20R (Abaqus)

Grain direction

Beam cross section



Beam

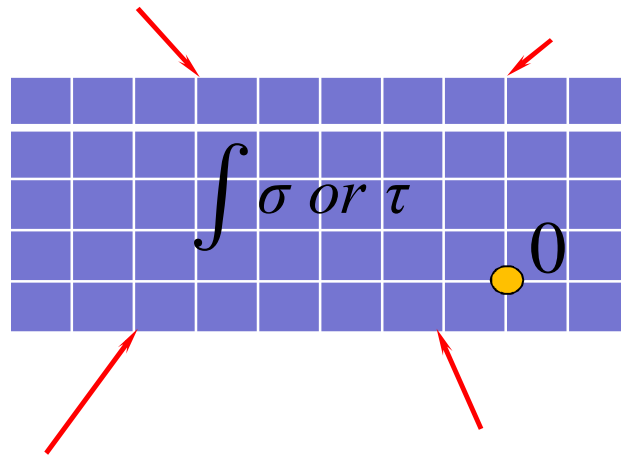


L

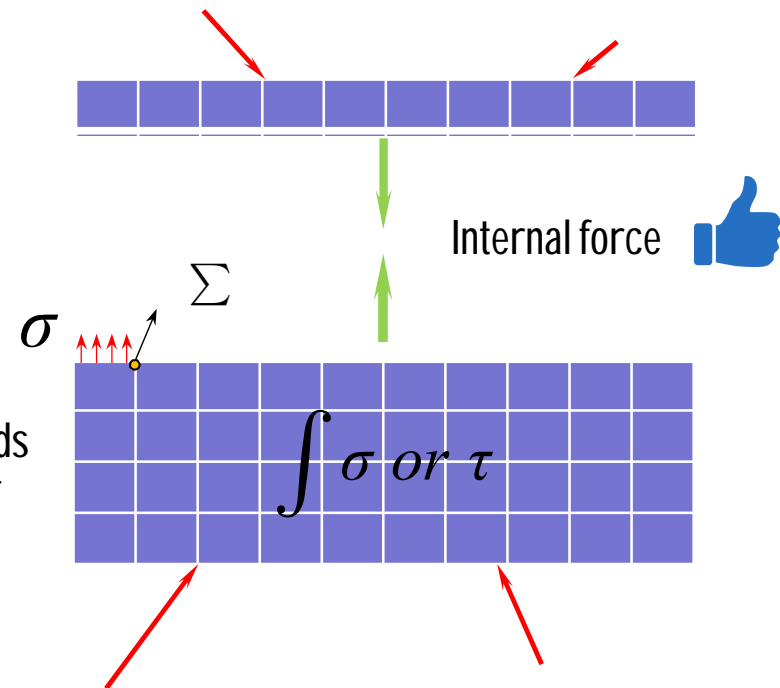
L

L/2

With FEM a powerful tool to conduct parametric investigation is stress integration



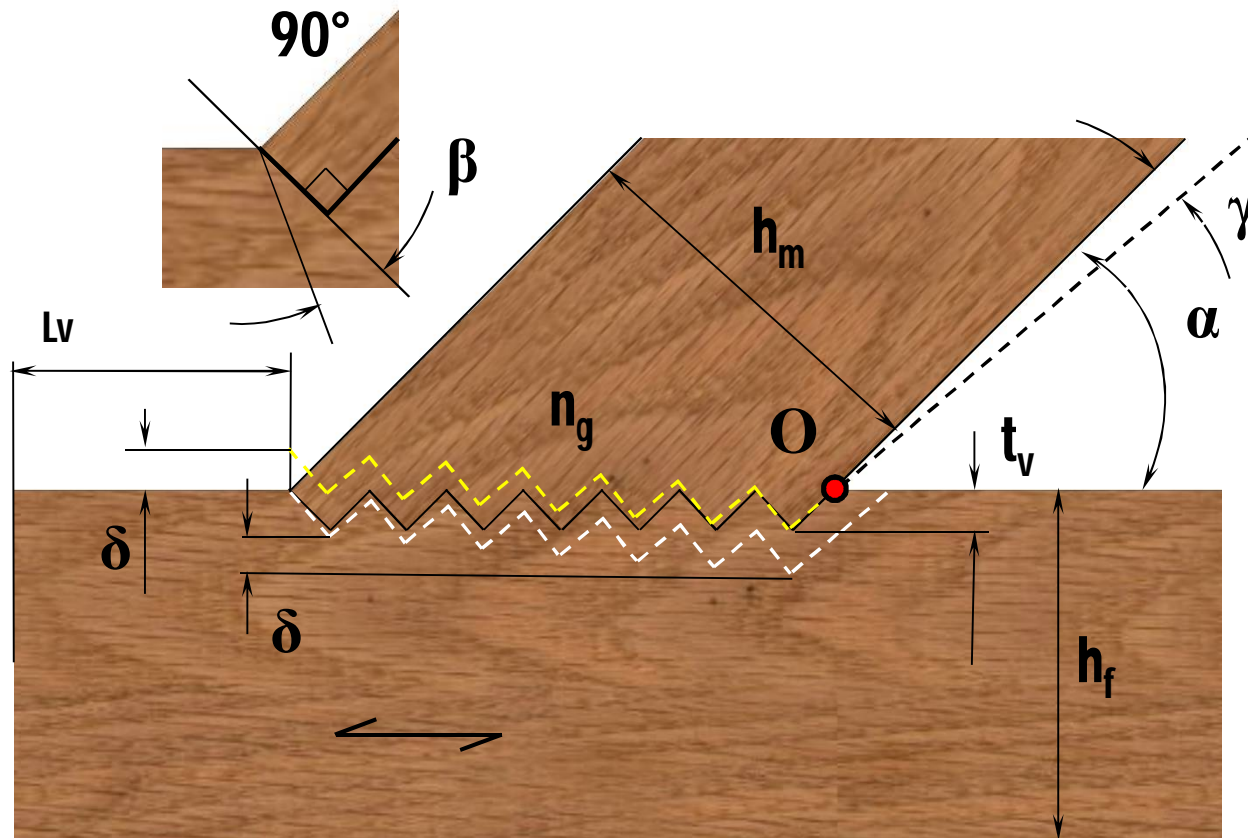
Reduce stress fields to parts of mesh



More practical on CAST3M than ABAQUS ==> because of time ABAQUS

Deep groove timber assembly

Parametric description



Main parameters :

α = angle between elements

h_m = male part height

h_f = female part height

l_v = end shear length

n_g = number of grooves

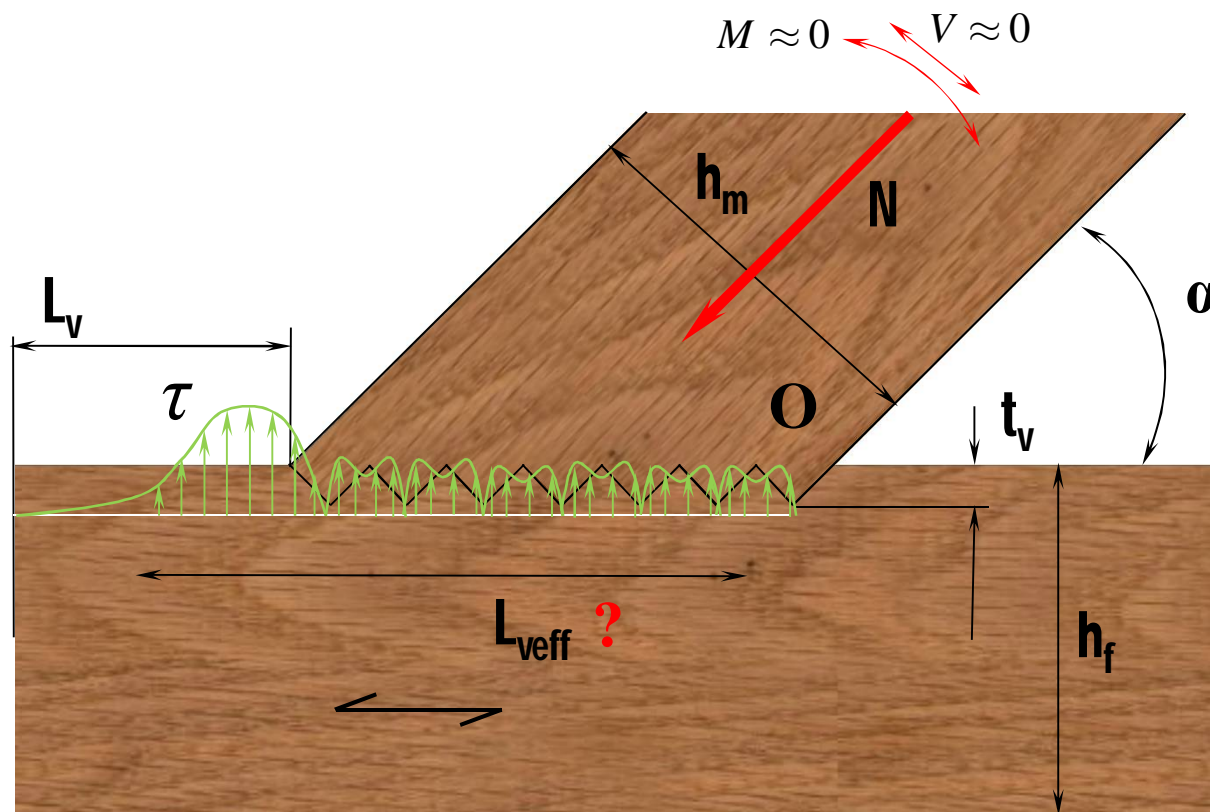
Additional parameters :

δ = groove offset

β = rectification angle

?

$$\text{groove depth } t_v = \frac{h_m}{\sqrt{2} \times n_g} \text{ if } \beta = 0 \quad \gamma = \text{atn} \left(\frac{\delta \times \sin \alpha}{h_m} \right)$$



Design approach:

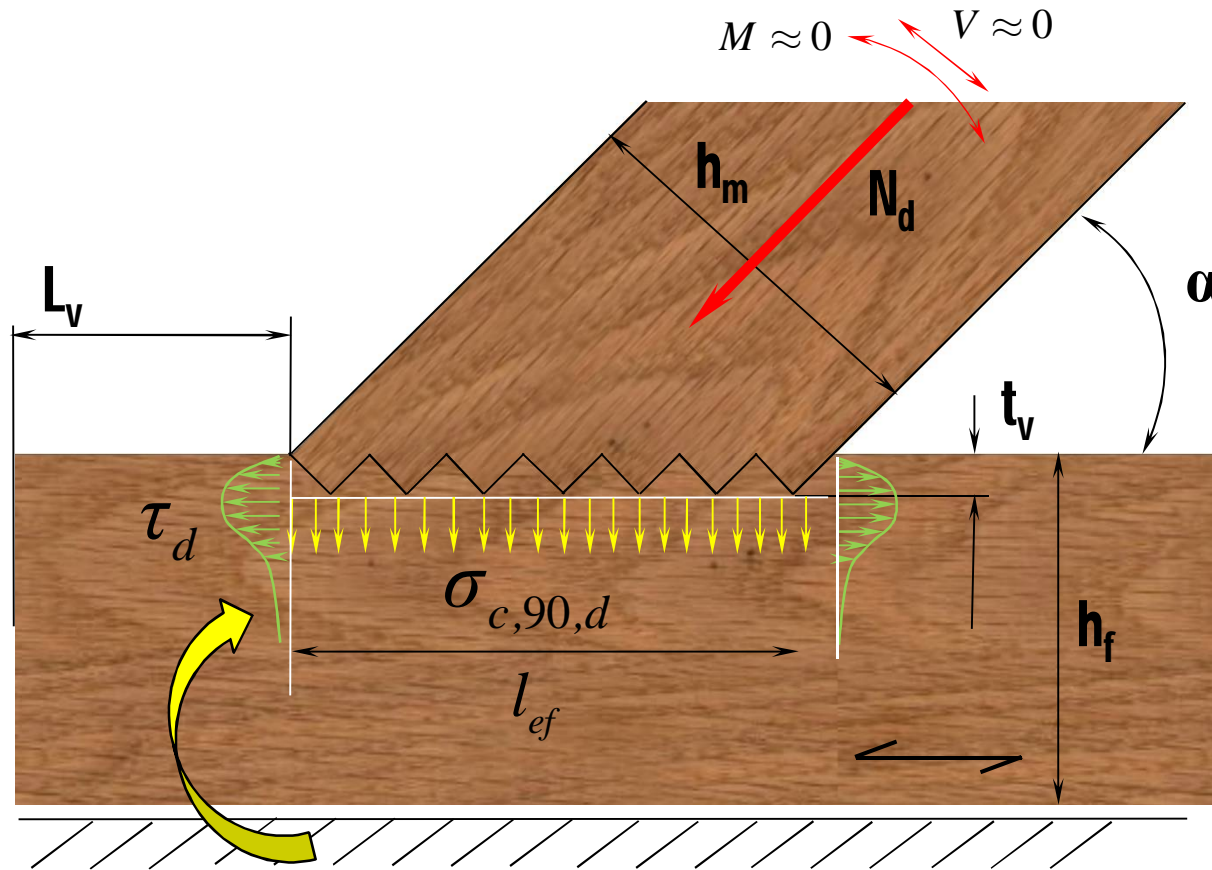
$$\tau = \frac{N \cos \alpha}{k_{cr} \times b_d \times l_{v,eff}}$$

$$\tau \leq f_{v,d}$$

$$l_{eff}(t_v; h_m; l_v) = \frac{\int_0^l \tau \times dx}{\tau_{max}}$$

bibliography
Analysis of stress MEF
distribution

Failure modes : Perpendicular compression



Design approach:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d \times \sin \alpha}{b_d \times l_{ef}}$$

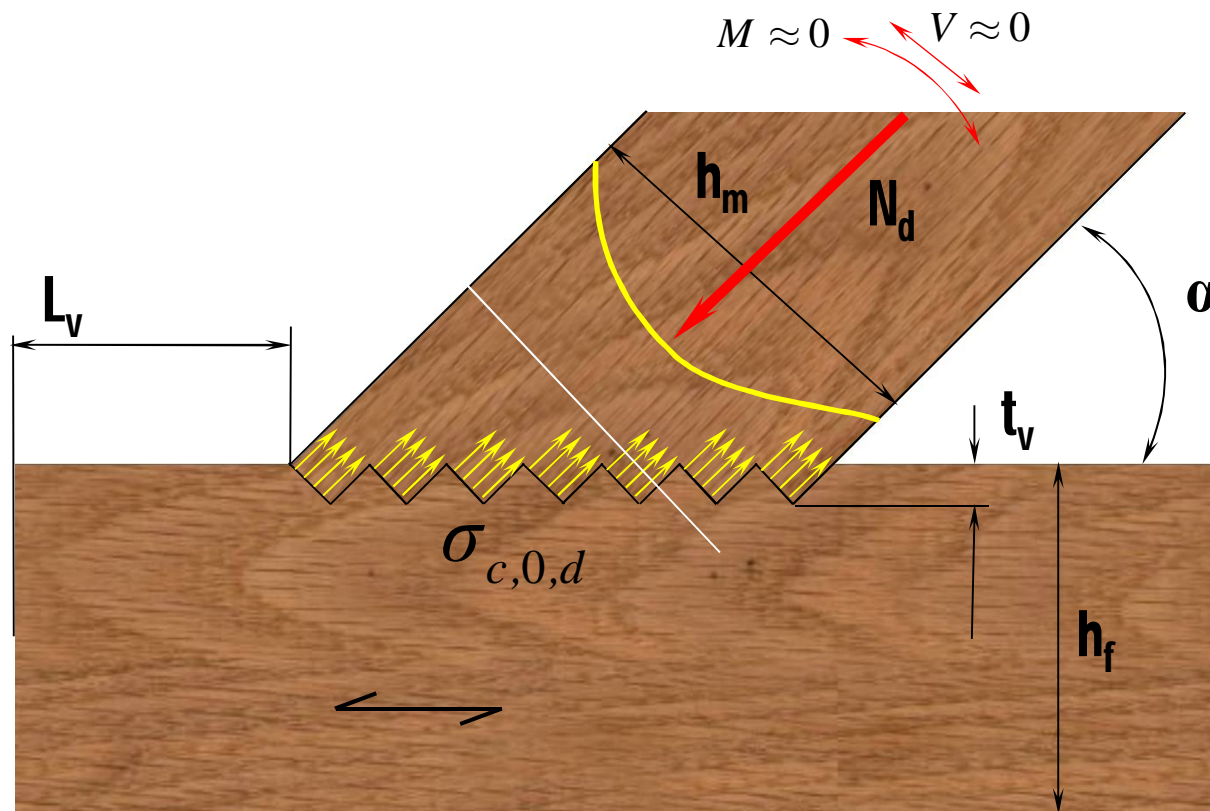
$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} \times f_{c,90,d}$$

$k_{c,90}$ for hardwood ?

Analysis of stress MEF distribution
Influence of boundary conditions

Deep groove timber assembly

Failure modes : Axial compression



Design approach :

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{b_d \times h_{m,eff}}$$

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d}$$

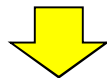
$$h_{m,eff}(h_m) = \frac{\int_0^{h_m} \sigma_{c,0,d} \times dx}{\sigma_{c,0,max}} \quad ?$$

Analysis of stress MEF distribution

DEFINE FOAM PARAMETERS



BIBLIOGRAPHY



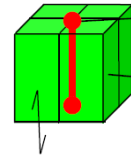
COMPRESSION TESTS α



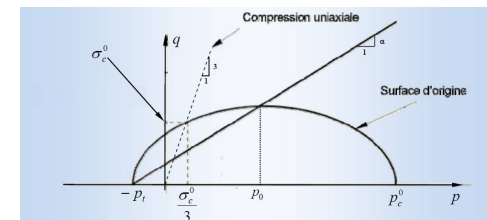
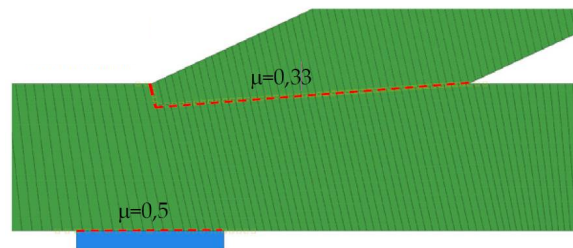
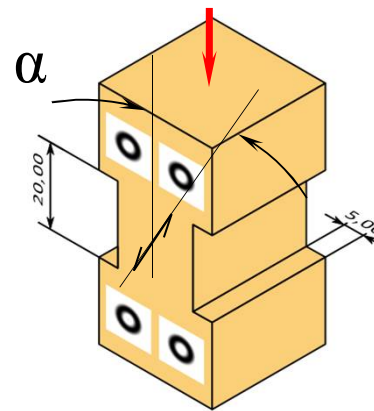
FOAM CALIBRATION (k , kt)



JOINT MODELLING

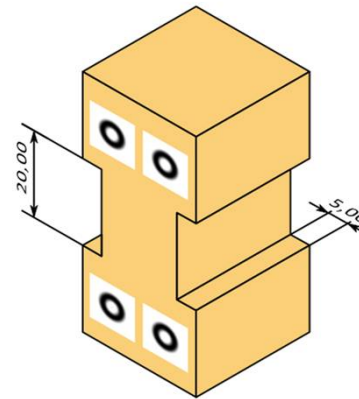
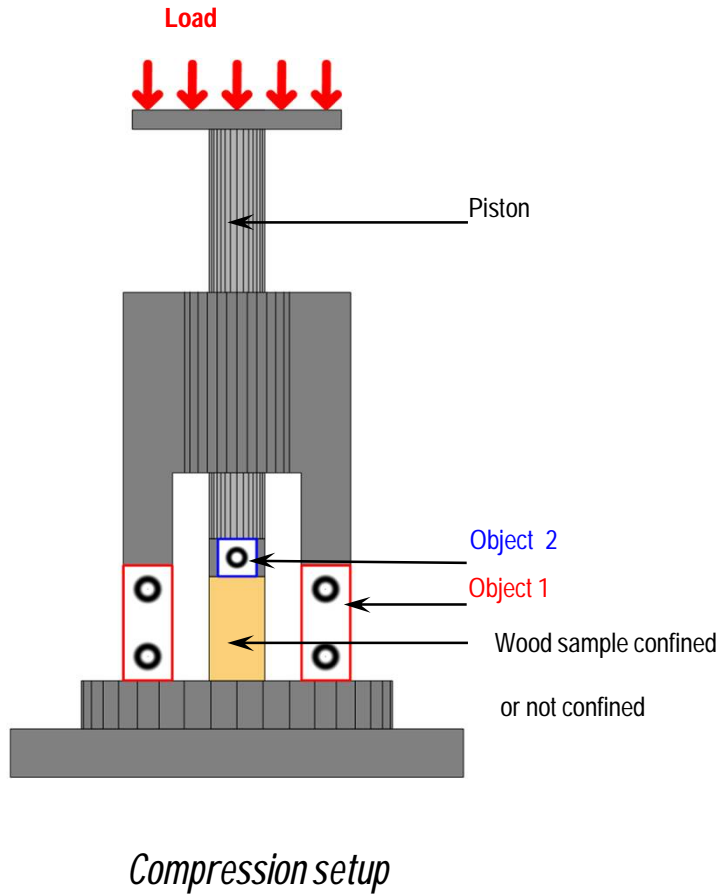


$E_0, E_{90}, G, f_{c,0}, f_v, f_{c,90}$ *beech, beech LVL, birch, oak*

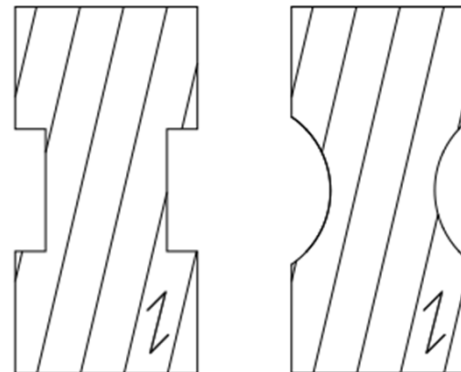


Deep groove timber assembly

Compression Setup



Bi-axial shear and compression tests

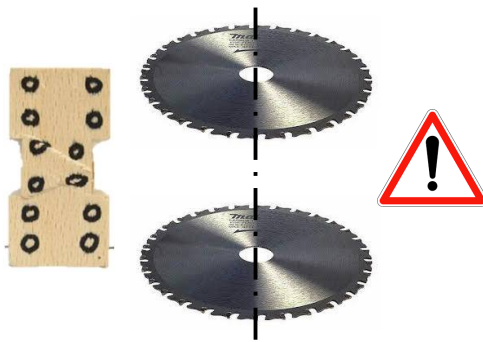


MODELLING

- Programming the modelling of sample with an angle to the grain and a special shape in the reduce area.

- Conduct a compression tests campaign :

4 species	Beech,	3 angles and 0° and 90° when necessary	
	Beech LVL,	near 25°	
	Birch,	near 50°	15 samples ==> 200 tests
	Oak	near 75°	

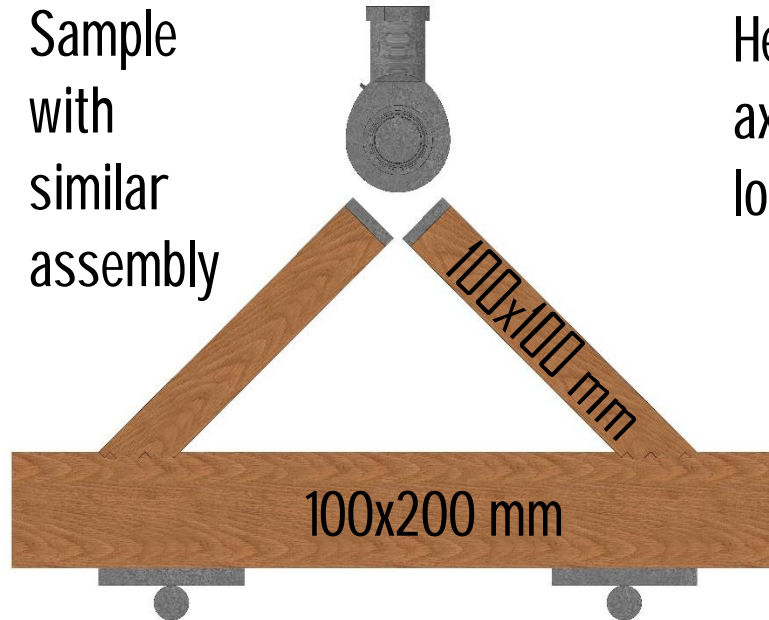
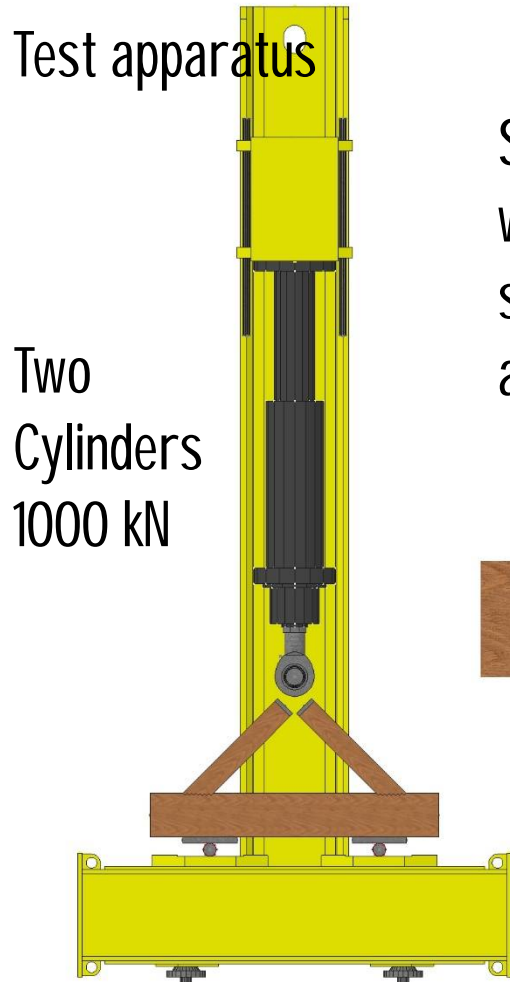


TRAINEE student Dmitri Parell 3rd year engineer

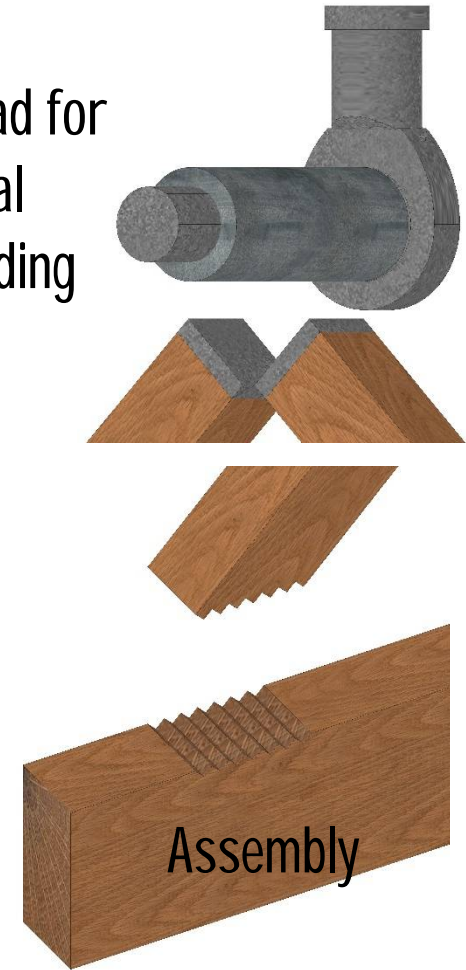
October 2020 to the end July 2021

Deep groove timber assembly

Assembly tests




Head for
axial
loading



Deep groove timber assembly

Assembly tests

- Parametric programming of the joint,
 - Conduct pre-tests with soft wood,
- 
- See with Simonin in the next week how many assembly of this type they can produce for their participation == > define the complete campaign and sample shape to study failure mode in shear, compression perpendicular to the grain and axial failure if possible.
 - Parametric MEF study of the joint : programming MEF analysis

TRAINEE student Mallaury Vagelli 3rd year engineer

October 2020 at the end June 2021

Multiple Deep grooves – foam-beam model

- Achieved : parametric description of deep groove timber assembly, abaqus parametric model (mesh, properties) for 2D compression test parallel and perpendicular to the grain.
- Planned : programming the modelling of sample with an angle to the grain and a special shape in the reduce area, conduct a compression tests campaign. Parametric programming of the deep groove timber assembly, conduct pre-tests with soft wood.



EU-Project ForestValue hardwood_joint

5th meeting | Online | 12-13 April 2021

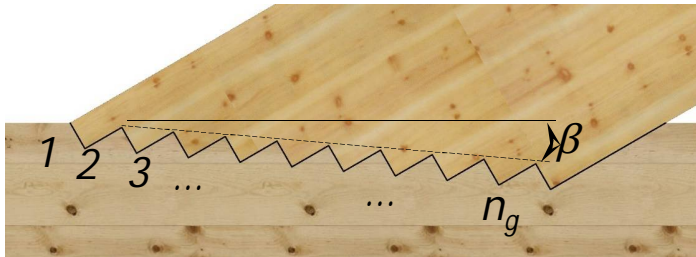
5- MULTIPLE Deep grooves – DESIGN CRITERIA USE OF foam-beam model

Dmitry PARRELL and Mallaury VAGELLI

Problem



Multiple Steps Joint (MSJ)



Grooves offset

Bibliography: Possible failure modes & design equations



Crushing at the front-notch surface [1]



Transverse compression below the joint [1]



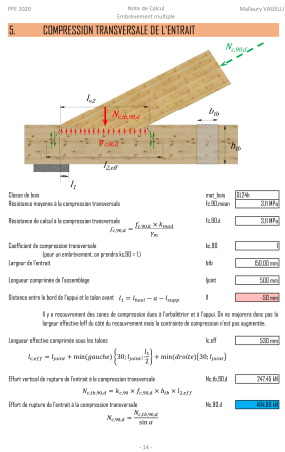
Shear crack at the heel depth [2]

[1] BLASS, H. J. et ENDERS-COMBERG, M., 2012. Fachwerkträger für den industriellen Holzbau

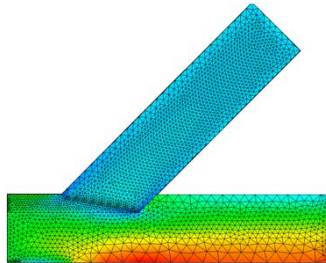
[2] BRANCO, J., VERBIST, M. et DESCAMPS, T., 2018. Design of three Step Joint typologies: Review of European standardized approaches

Reasoning

I Specification

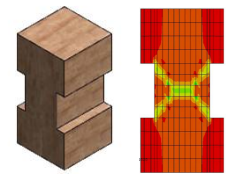


III Finite Element Modelling

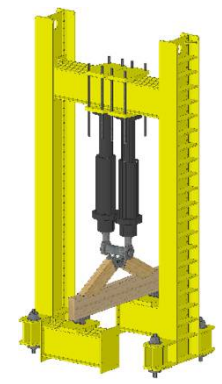


- Unknown criterion
- Shear stress distribution I_{veff} and $k_{v,red}$
 - Angular compressive strength $f_{c,\alpha,k}$
 - Eccentricity I_{ecc}

II Hardwood properties



IV Experimental campaign



Verify failure modes emergence
Validate FEM

V Criterion formulae

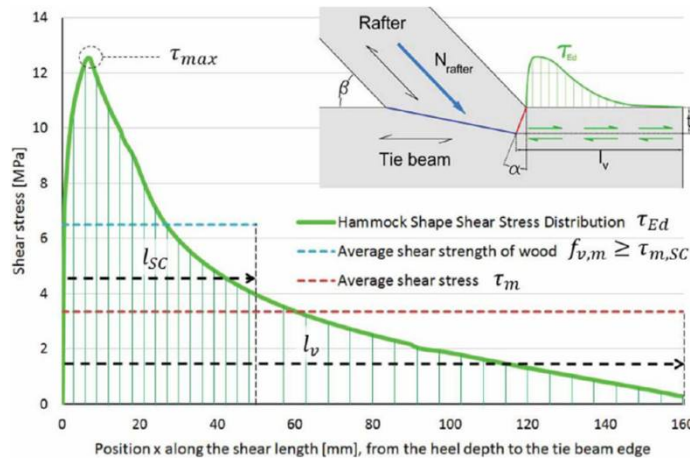
Hypotheses

$$f_{c,\alpha,k} = \frac{f_{c,0,k} \cdot k_{c,\alpha}}{\sqrt{\left(\frac{f_{c,0,k}}{f_{c,90,k}} \cdot \sin^2 \alpha\right)^2 + \left(\frac{f_{c,0,k}}{1,5 \cdot f_{v,k}} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha\right)^2 + \cos^4 \alpha}}$$

$f_{c,\alpha,k}$: Norris Criteria
 $k_{c,\alpha} = 1$



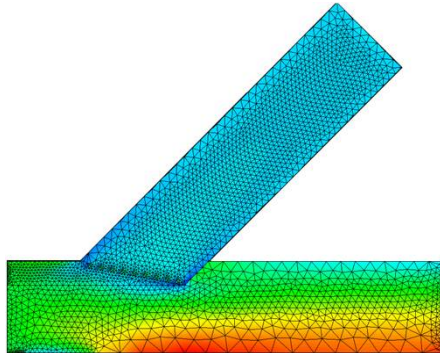
Equal stiffness
 No tension crack in the rafter [1]



$l_{v,eff}$ & $k_{v,red}$: HSSSD [3] (Single Step Joint)

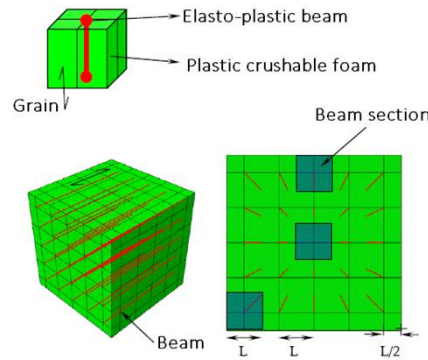
[3] VERBIST, M., BRANCO, J. et DESCAMPS, T., 2020. Cohesive zone models of single step joint damaged due to the shear crack

Finite Elements Model

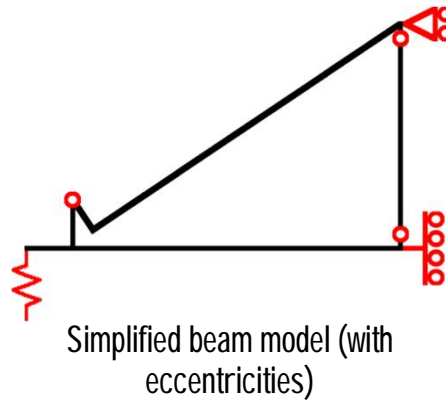


Elasticity – Cast3M
Plasticity – Abaqus

- Eccentricities
- Shear stress distribution
- Stiffness
- Angular compression



Plastic foam-beam material [4]

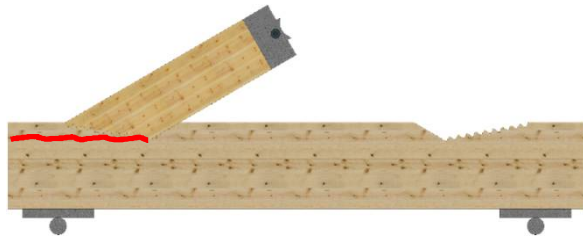


Simplified beam model (with eccentricities)

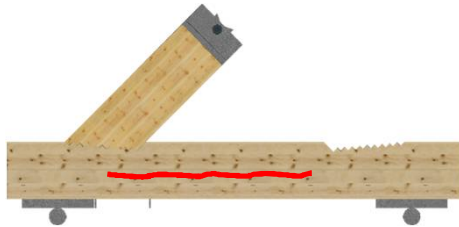
Parametric to deduce
criterion formulae

[4] TAVAKOLI-GHEYNANI, Imane, 2011. Modélisation tridimensionnelle d'assemblages de structure bois en tôle pliée mince par la méthode des éléments finis

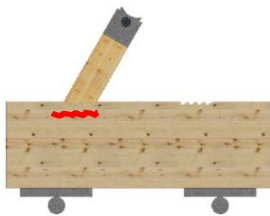
Experimental campaign



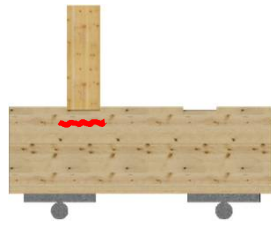
Shear crack at the heel depth ($l_{v,eff}$ & $k_{v,red}$)



Bending/Shear in the reduced section (l_{ecc})



Transverse compression
($f_{c,\alpha,k}$)



Edge effects ($k_{c,90}$)

4 configurations tested
 $\alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$

5 species tested

- Spruce
- Beech
- Oak
- Birch
- Beech LVL

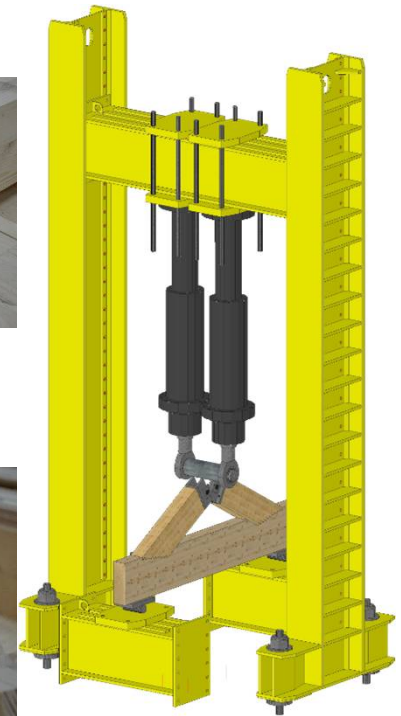
5-axis gantry robot machining



Rafter machining

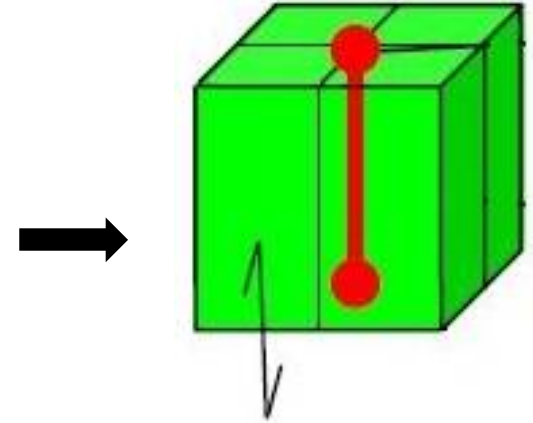
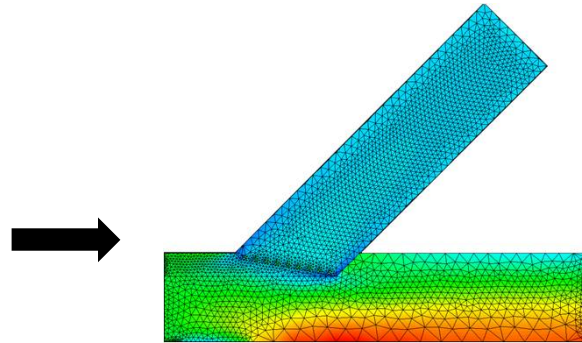
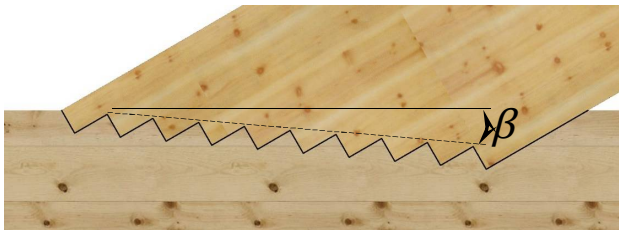


Tie-beam machining

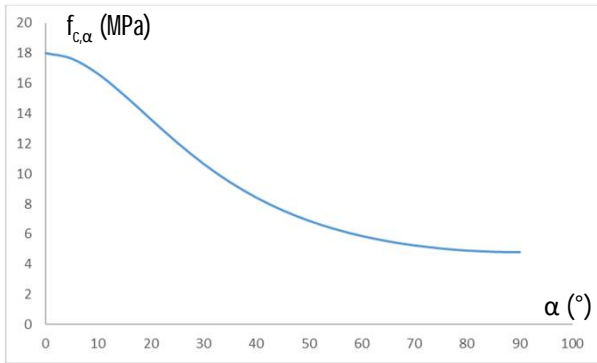


Test setup

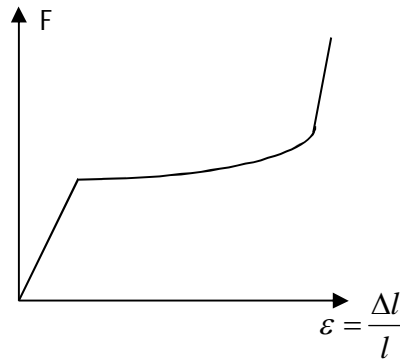
Hardwood properties – Foam beam modelling



Grain direction



- f_v
- Compression law



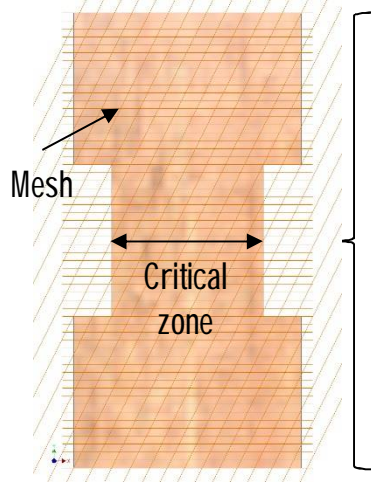
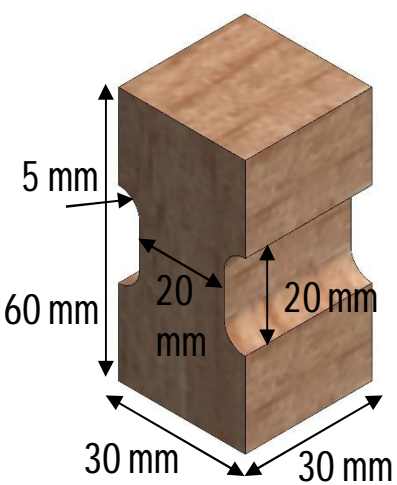
- k ?
- k_t ?

Comparison criterion:

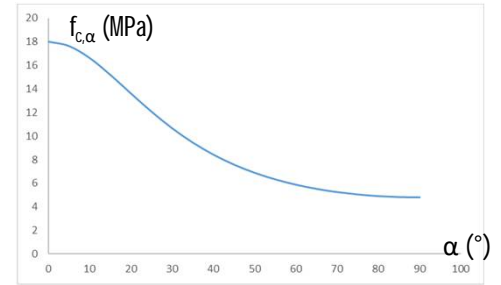
- Hankinson ?
- Norris ?

Parameters to determine →
Compression tests

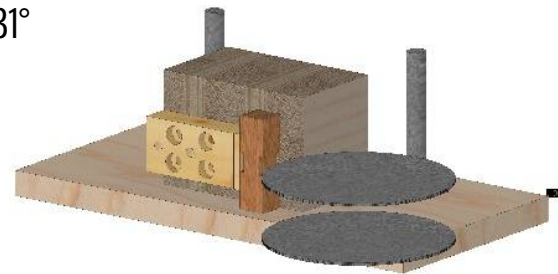
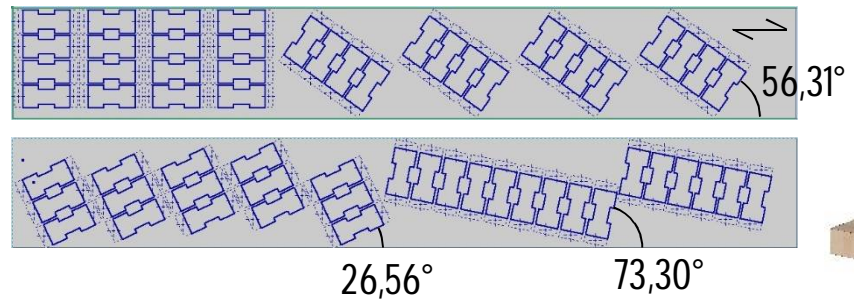
Hardwood properties – Foam beam modelling



- 30 samples
- 5 grain directions
 - 0,00°
 - 26,56°
 - 56,31°
 - 73,30°
 - 90,00°
- 4 species
 - Beech
 - Oak
 - Birch
 - LVL beech

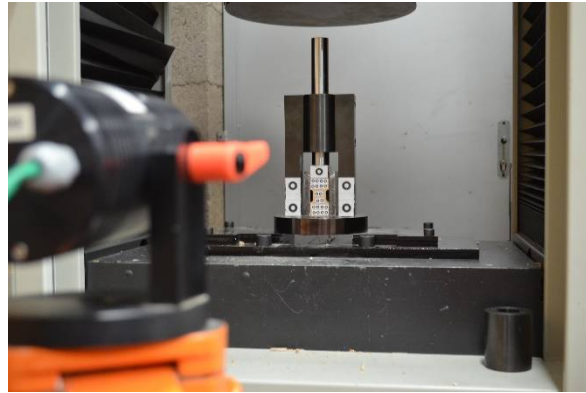
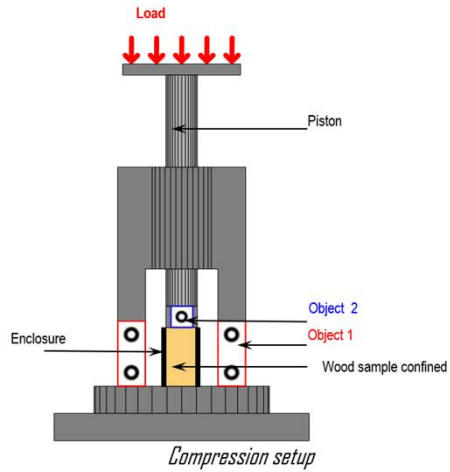


- k
- k_t



Machining samples on Computer Numerical Control (CNC)

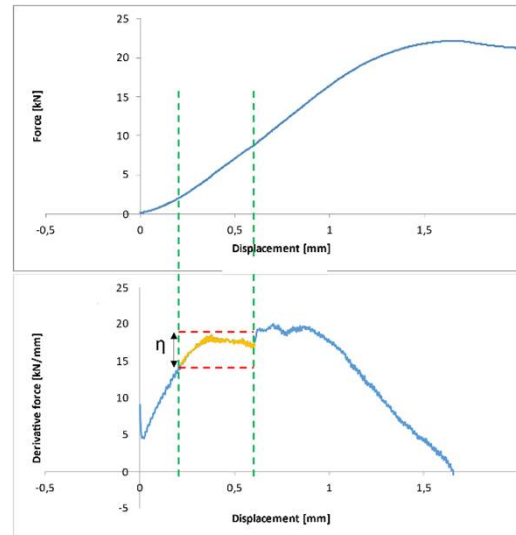
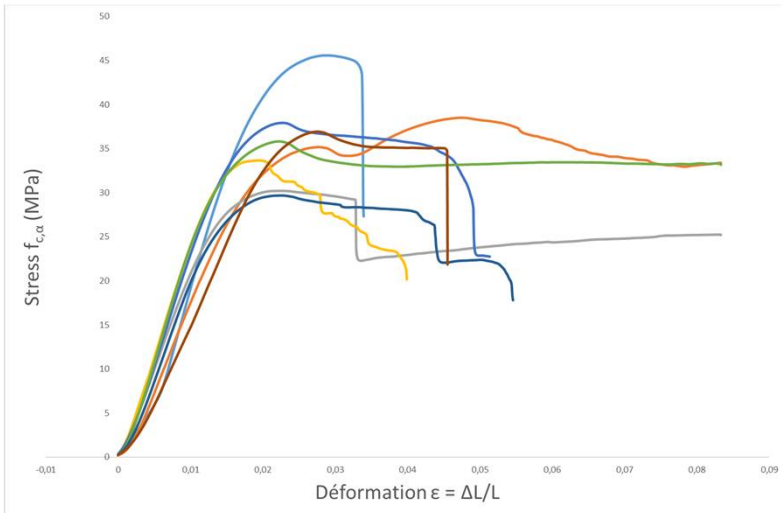
Hardwood properties - Compression tests



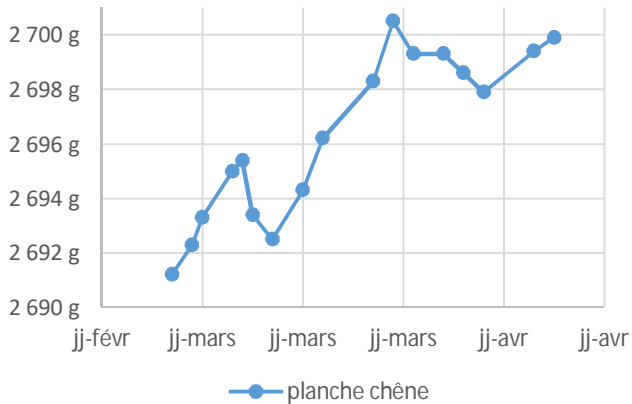
Grain direction: 0.00°



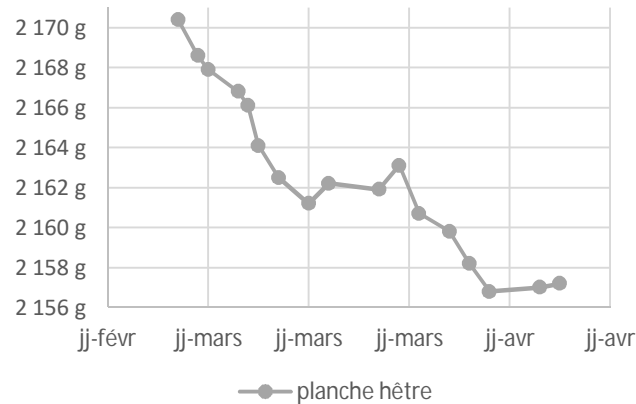
Grain direction: 56,31°



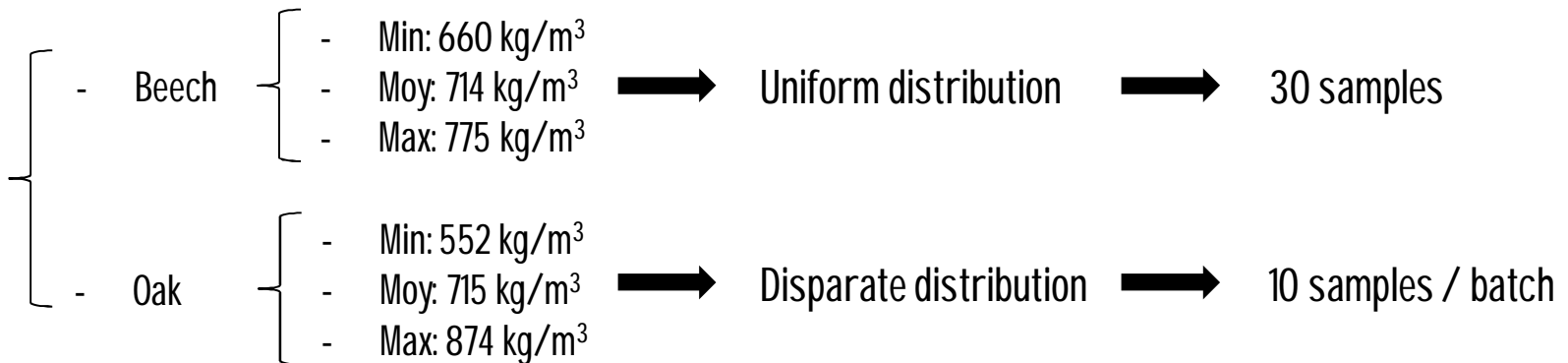
Hardwood properties - Compression tests



Oak humidity follow-up



Beech humidity follow-up



Multiple Deep grooves – foam-beam model

Dmitry PARRELL and Mallaury VAGELLI

Achieved:

- Compression tests on softwood
- Cast3M elastic model
- Multiple Step Joint robotic machining

Planned:

- Compression tests on hardwood
- Abaqus model with foam/beam material
- Multiple Step Joint experimental campaign on softwood and hardwood



EU-Project ForestValue hardwood_joint

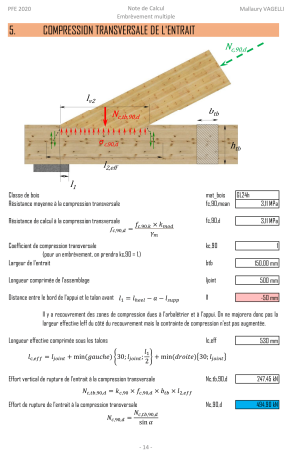
6th meeting | Épinal | 27-28 September 2021

5- MULTIPLE Deep grooves – DESIGN CRITERIA USE OF foam-beam model

Dmitry PARRELL, Mallaury VAGELLI, Annabelle HOSPITAL, Thibault BENISTAND and Jean-Francois BOCQUET

Reasoning

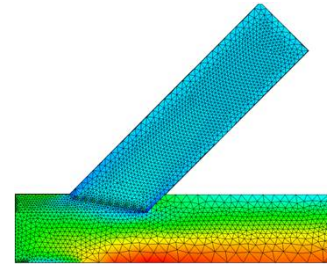
I Specification



Unknown criterion

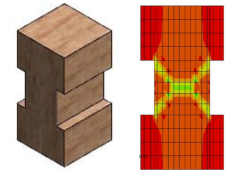
- Shear stress distribution l_{veff} and $f_{v,red}$
- Angular compressive strength $f_{c,\alpha,k}$
- Eccentricity l_{ecc}

III Finite Element Modelling



3

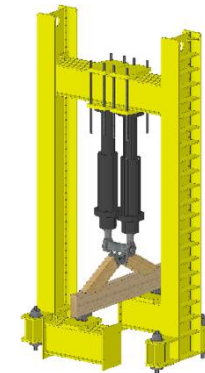
II Hardwood properties



1

V Criterion formulae

IV Experimental campaign

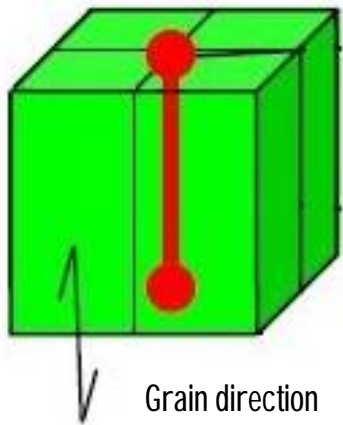


Verify failure modes emergence

Validate FEM

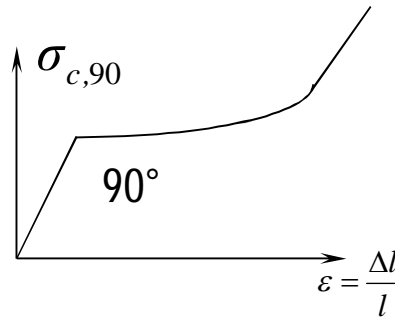
2

Hardwood properties – Properties for foam beam modelling



- k
- kt ?

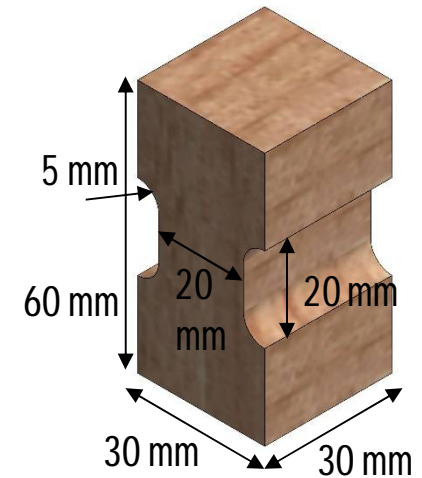
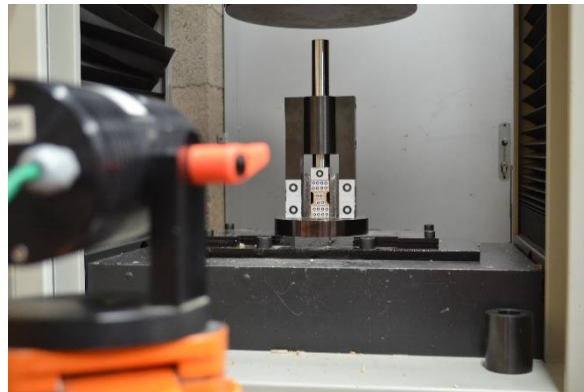
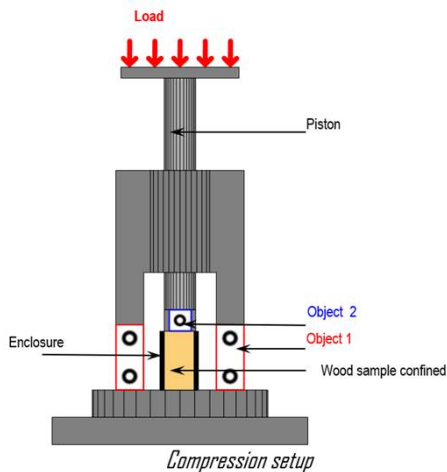
- $f_v, f_{t,90}, f_{c,0}, E_0$
- Compression 90° law



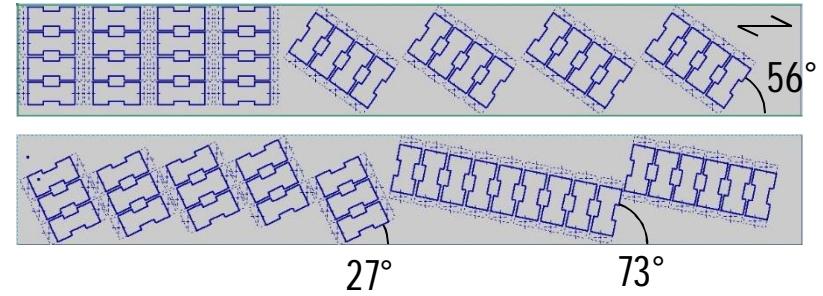
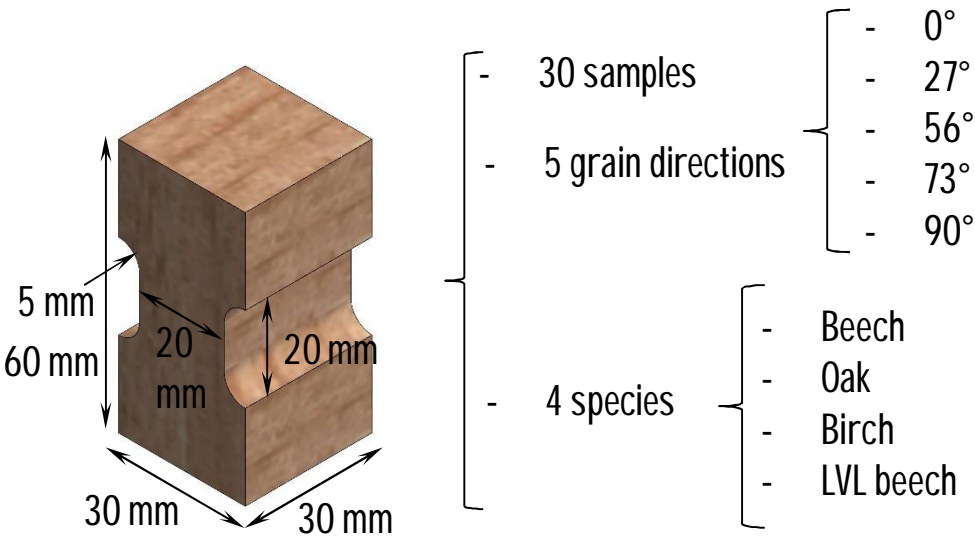
Comparison criterion:

- Hankinson ?
- Norris ?

Compression test at different angles

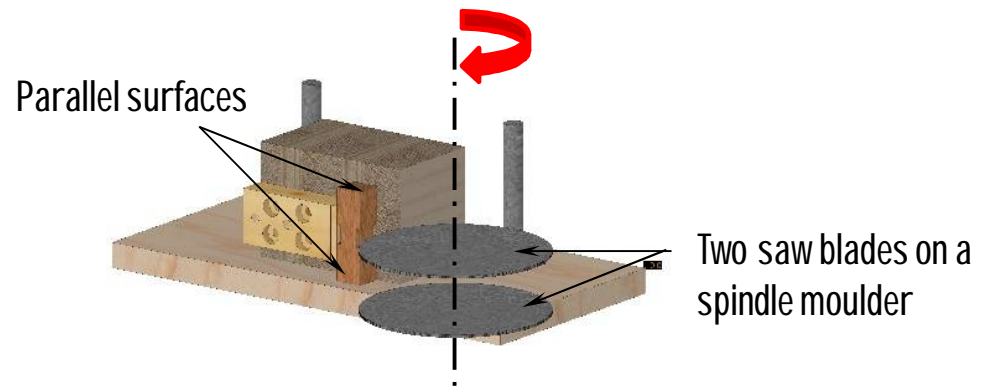


Hardwood properties – Foam beam modelling

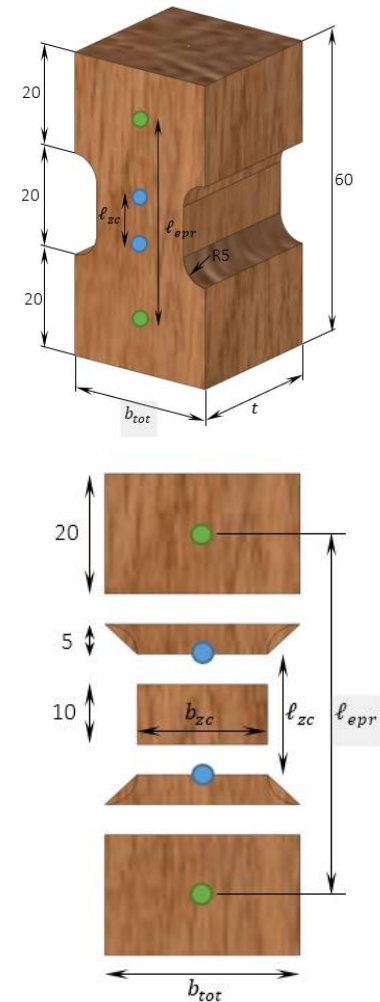
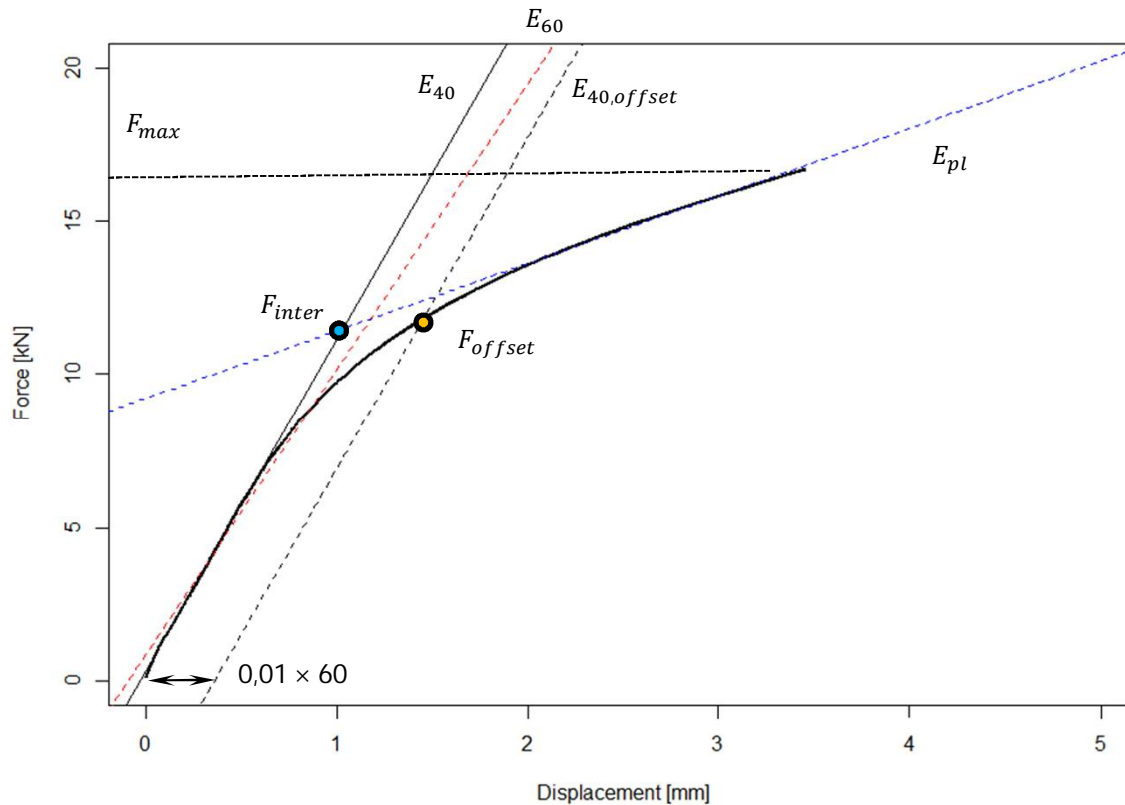


Machining samples on Computer Numerical Control (CNC)

600 tests



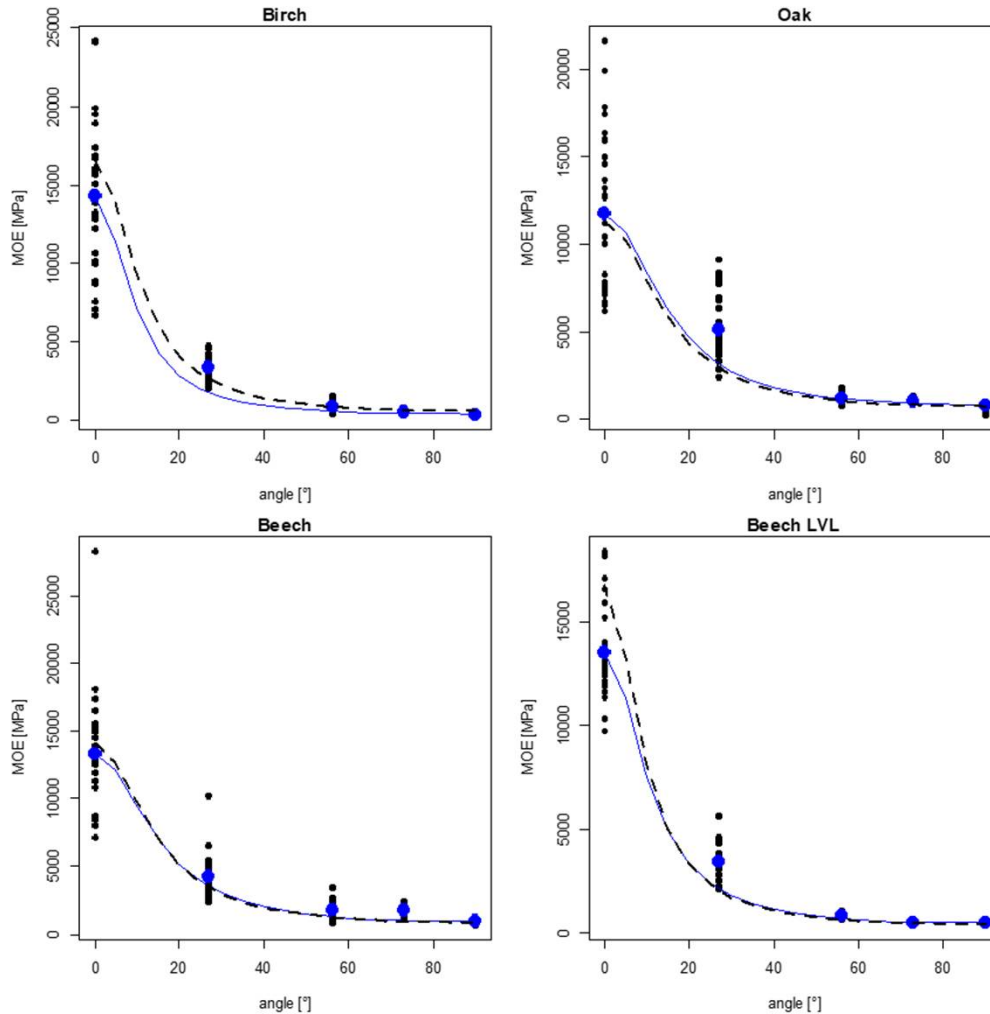
Hardwood properties - Compression tests



Young modulus determination

$$E_{epr} = \frac{\Delta F}{\Delta l_{epr}} \times \frac{1}{t} \left(\frac{l_{epr} - 20}{b_{tot}} + \frac{10}{(b_{tot} + b_{zc})/2} + \frac{10}{b_{zc}} \right)$$

Hardwood properties – Young modulus (angles and species)



● : average of tests results

— : Hankinson model with tests results

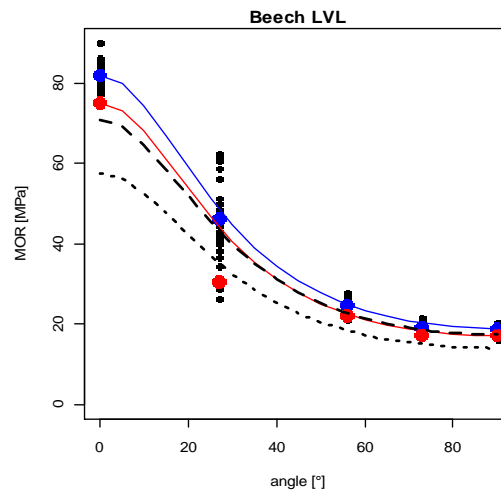
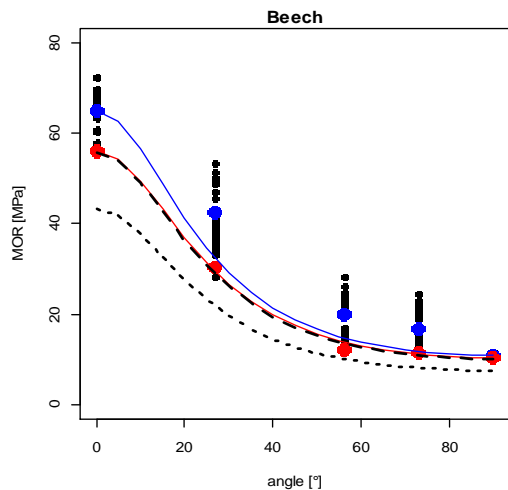
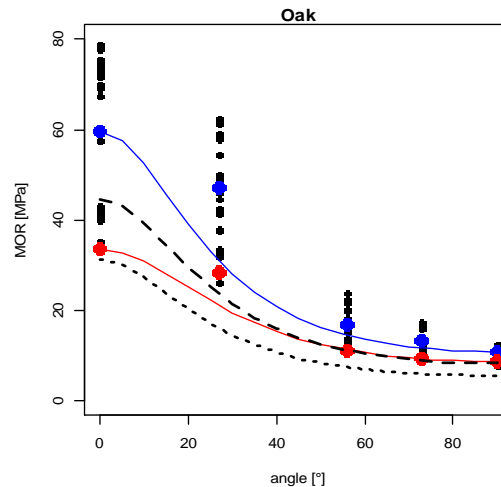
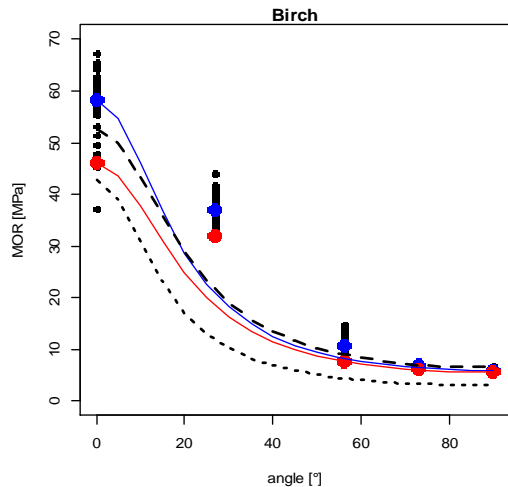
$$E_{\alpha,mean} = \frac{E_{0,mean}}{\frac{E_{0,mean}}{E_{90,mean}} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

--- : Hankinson model with values from :

- COLINS et FINK Birch
- BENISTAND Beech and Oak
- POLLMEIER Beech LVL

Validated experimental approach

Hardwood properties – Strength Hankinson ²

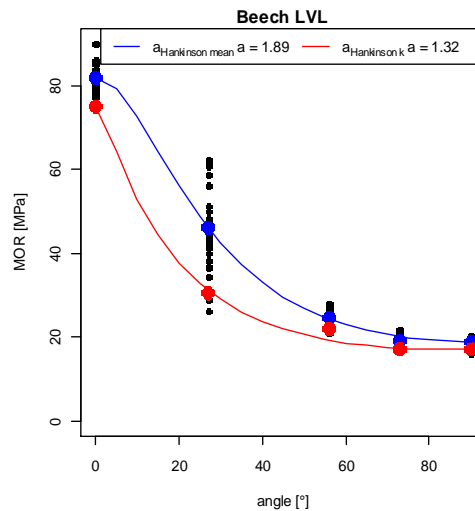
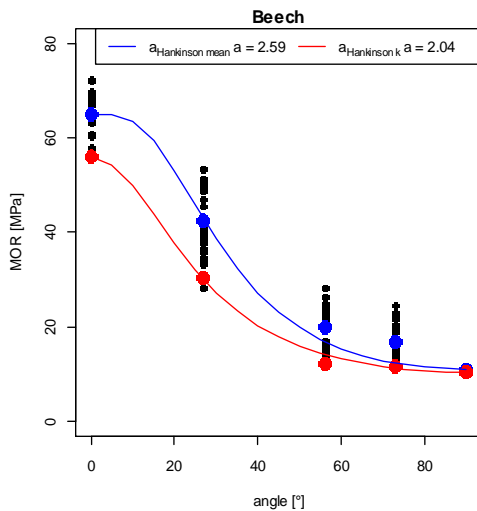
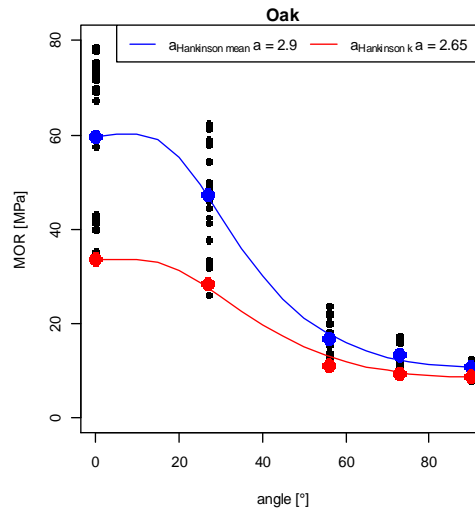
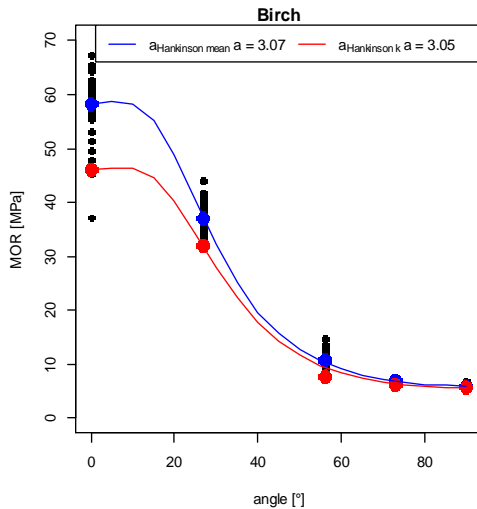


$$f_{c,\alpha,k \text{ or mean}} = \frac{f_{c,0,k \text{ or mean}}}{\frac{f_{c,0,k \text{ or mean}}}{f_{c,90,k \text{ or mean}}} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

- : average of tests results
- : characteristic of tests results
- : Hankinson model with average test values
- : Hankinson model with characteristic test values
- - : Hankinson model with respectively average and characteristic values from :
 - COLINS et FINK Birch
 - BENISTAND Beech and Oak
 - POLLMEIER Beech LVL

f_{c,0} for small sample gives higher values

Hardwood properties – Strength Hankinson a



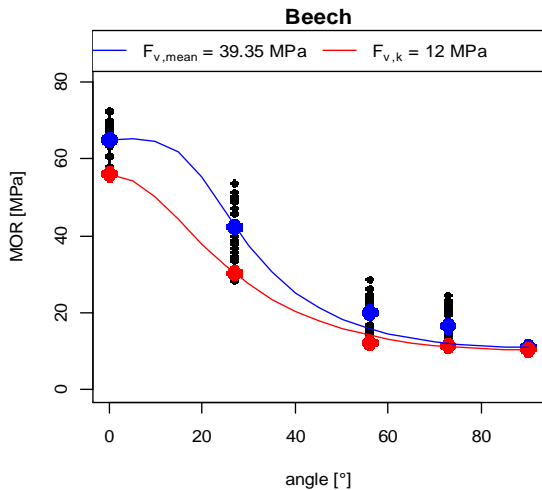
$$f_{c,\alpha,k \text{ or mean}} = \frac{f_{c,0,k \text{ or mean}}}{\frac{f_{c,0,k \text{ or mean}}}{f_{c,90,k \text{ or mean}}} \sin^a \alpha + \cos^a \alpha}$$

- : average of tests results
- : characteristic of tests results
- : Hankinson model with average test values
- : Hankinson model with characteristic test values

Hardwood properties – Strength NORRIS

$$f_{c,\alpha,k \text{ or mean}} = \frac{f_{c,0,k \text{ or mean}}}{\sqrt{\left(\frac{f_{c,0,k \text{ or mean}}}{f_{c,90,k \text{ or mean}}} \sin^2 \alpha\right)^2 + \left(\frac{f_{c,0,k \text{ or mean}}}{1,5 f_{v,k \text{ or mean}}} \sin \alpha \cos \alpha\right)^2 + \cos^4 \alpha}} \quad f_{v,k \text{ or mean}} \quad ? \quad \text{Reverse analysis}$$

- : average of tests results
- : characteristic of tests results
- : Norris model with average test values
- : Norris model with characteristic test values



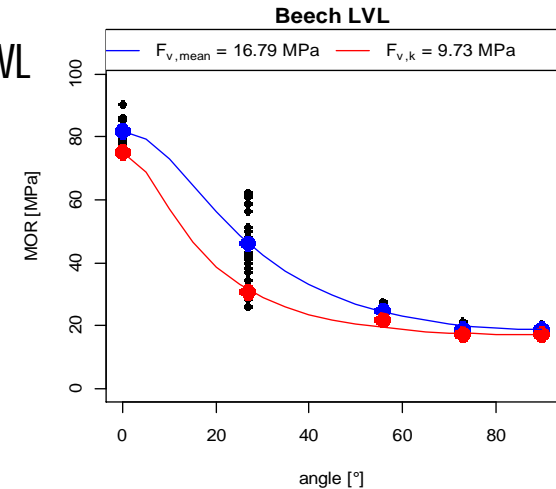
BENISTAND Beech

$$f_{v,mean} = 12,38 \text{ Mpa}$$

$$f_{v,k} = 10,19 \text{ Mpa}$$

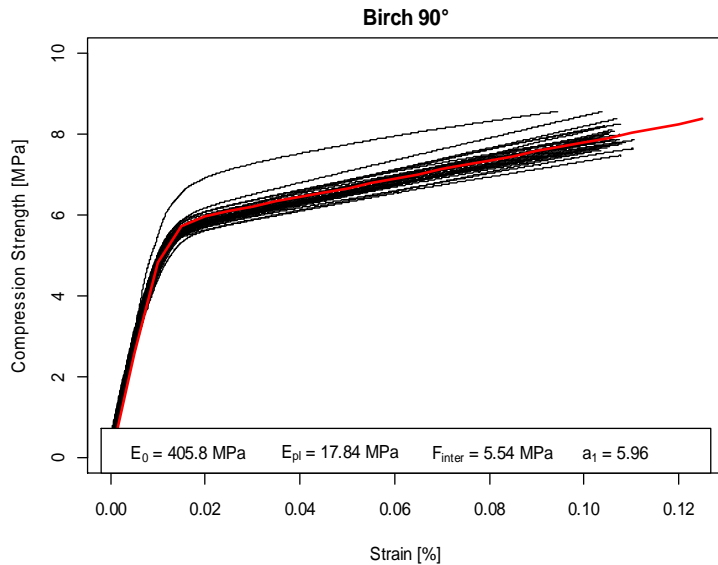
POLLMEIER Beech LVL

$$f_{v,k} = 7,8 \text{ Mpa}$$



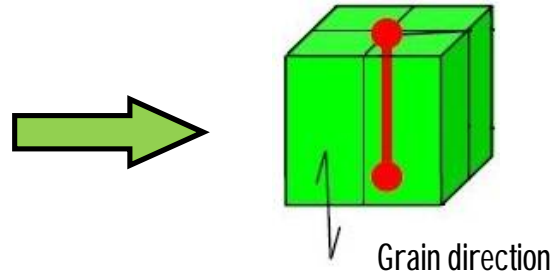
Not possible for Oak and Birch because of 27° to high values

Hardwood properties – Compression law 90 °, 56°, 73 °



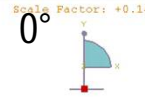
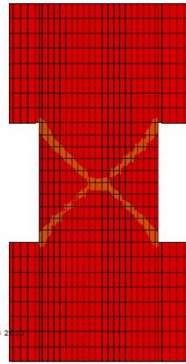
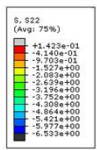
Richard Abbott mathematical law

$$f_{c,90}(\varepsilon) = \frac{(E_0 - E_{pl}) \cdot \varepsilon}{\left[1 + \left[\frac{(E_0 - E_{pl}) \cdot \varepsilon}{f_{inter}} \right]^{a_1} \right]^{\frac{1}{a_1}}} + E_{pl} \cdot \varepsilon$$



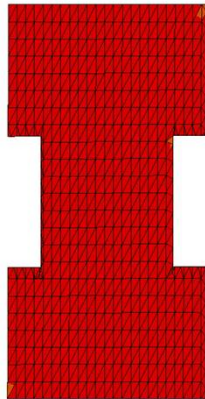
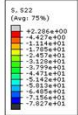
Species	Angle	E_0	E_{pl}		a_1
Birch	56	852	41	10,08	3,47
	73	501	18	6,83	3,06
	90	405	17	5,54	5,96
Oak	56	1174	25	18,67	2,28
	73	995	44	12,96	4,16
	90	816	37	10,29	5,29
Beech	56	1785	43	21,13	2,37
	73	1709	44	16,62	3,08
	90	915	30	10,94	2,83
LVL	56	862	49	24,67	4,86
	73	563	103	15,68	3,64
	90	508	102	15,36	3,54

Hardwood properties – Modelling compression test



ODB: Compression.odb Abaqus/Standard 6.14-2 Thu Oct 08 18:38:56 GMT+02:00 2021

Step: Step-1
Increment: 91; Step Time = 8.2799E-02
Primary Vari: S, S22
Deformed Vari: U; Deformation Scale Factor: +1.000e+00



Step: Step-1; Frame: 9
Total Time: 0.093608

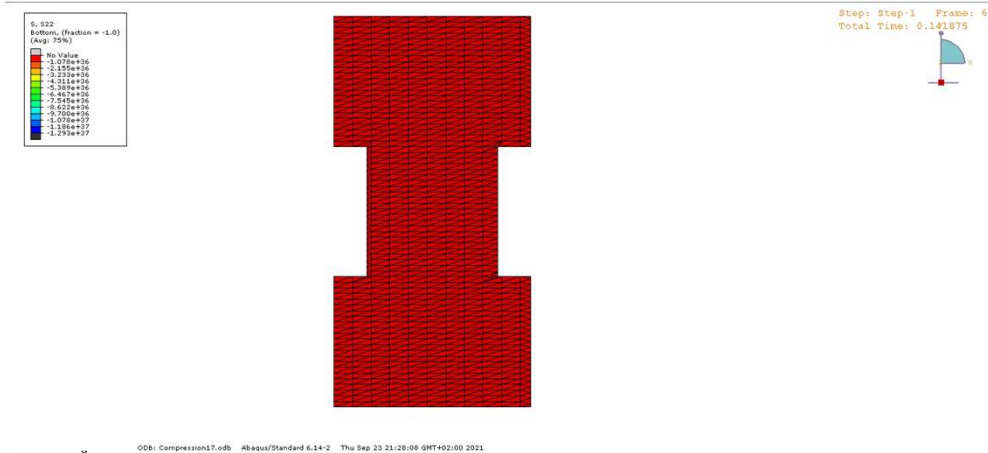
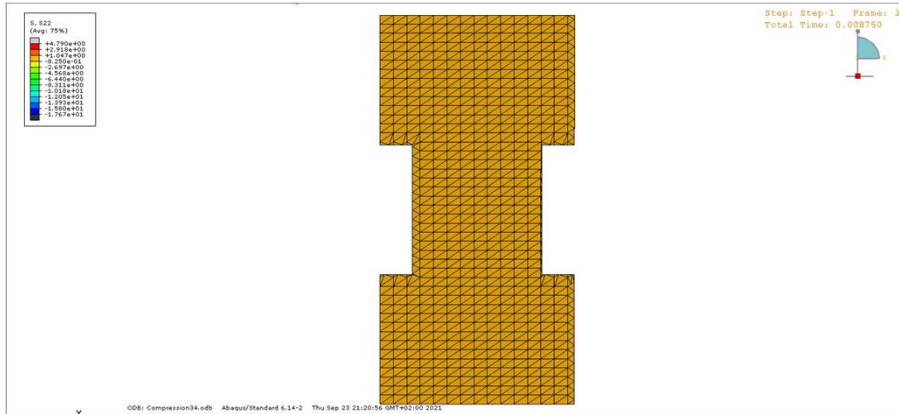


ODB: Compression3.odb Abaqus/Standard 6.14-2 Thu Sep 23 20:53:17 GMT+02:00 2021

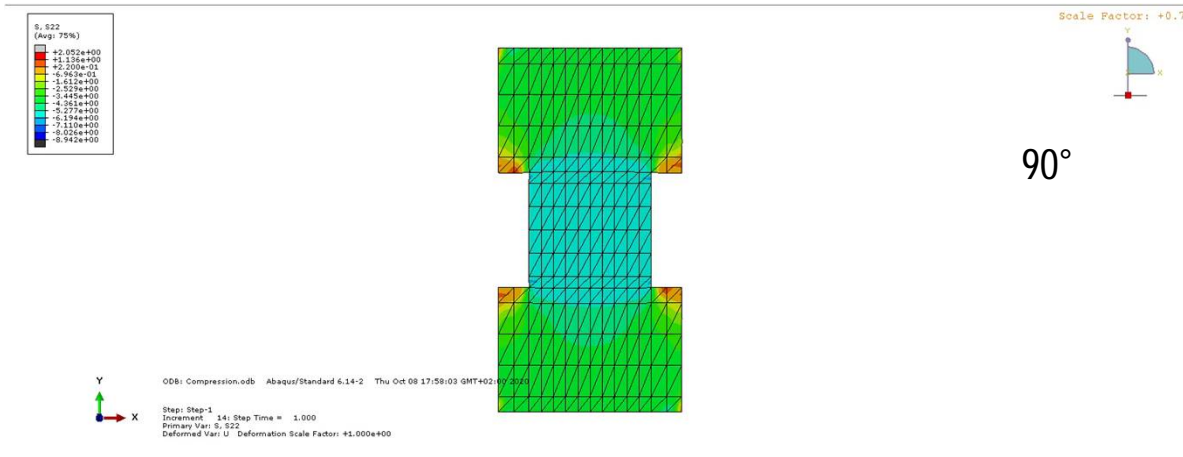
Step: Step-1
Increment: 9; Step Time = 3.3608E-02
Primary Vari: S, S22
Deformed Vari: U; Deformation Scale Factor: +1.000e+00

Hardwood properties – Modelling compression test

0°

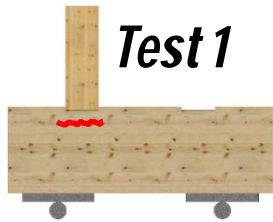


Hardwood properties – Modelling compression test



- From test results, define the parameters to introduce in Abaqus and define the missing parameters **k** and **kt** of the foam that fit the best to the results for Hankinson² and ^A models.
- Produce a parametric model of the joint and run

Experimental campaign joint tests : pre tests in soft wood



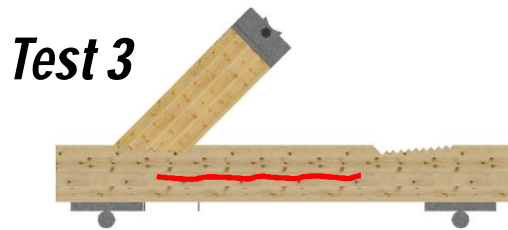
Test 1

Edge effects ($k_{c,90}$)



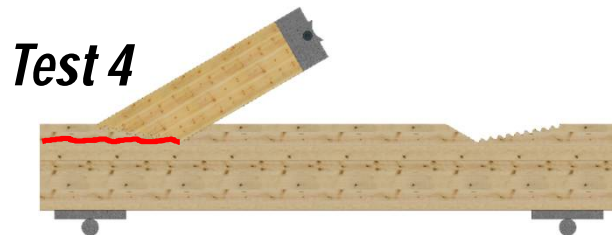
Test 2

Transverse compression ($f_{c,\alpha,k}$)



Test 3

Bending/Shear in the reduced section (l_{ecc})



Test 4

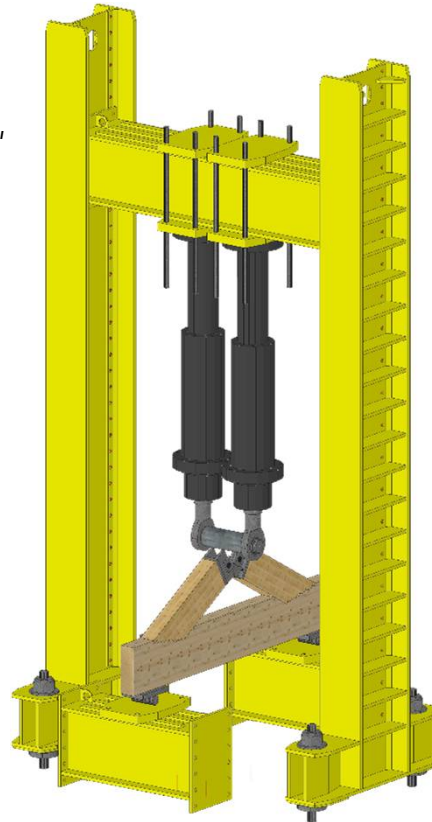
Shear crack at the heel depth ($l_{v,eff}$ & $k_{v,red}$)

Test apparatus

4 configurations tested
 $\alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$

5 species tested

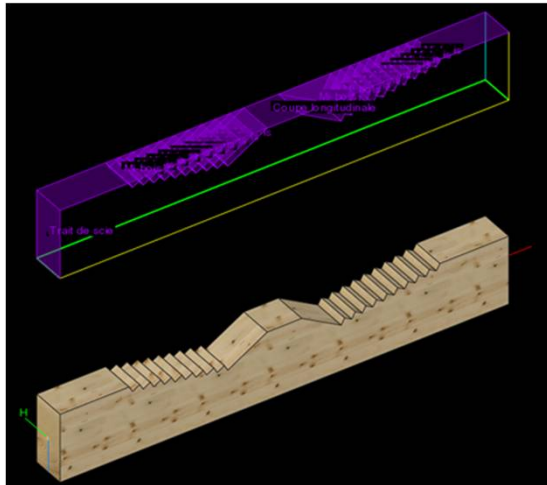
- Spruce
- Beech
- Oak
- Birch
- Beech LVL



Principal : 2 Opposite connections per test



Experimental campaign joint tests : manufacturing the joints



BTL Files with Ligno cam



Wood flex gantry robot

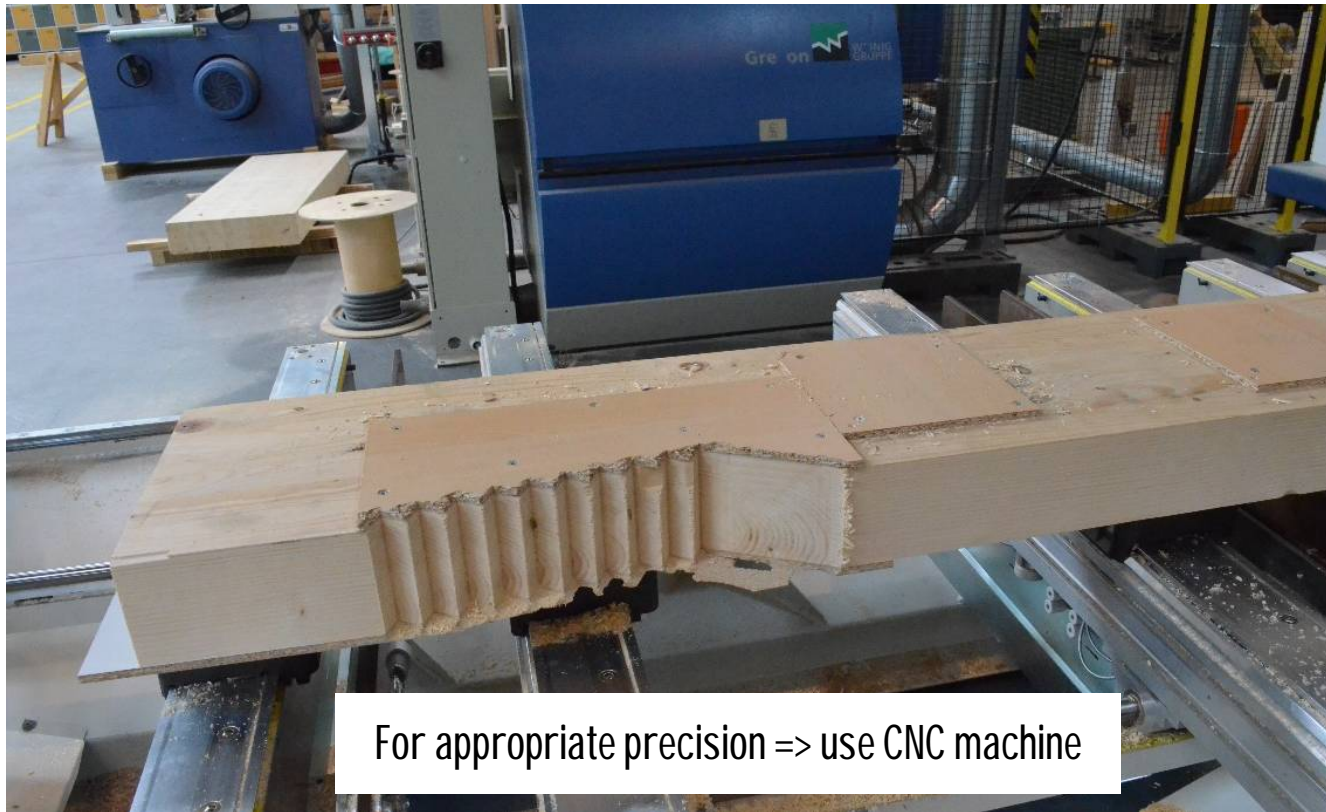


Tie-Beam



Rafter

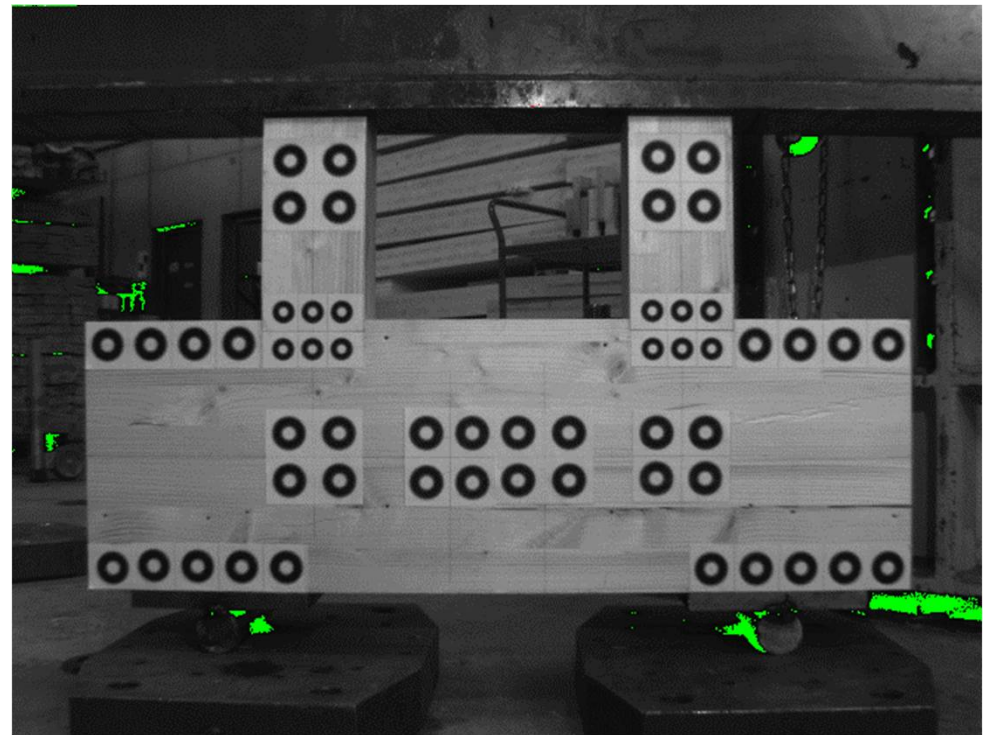
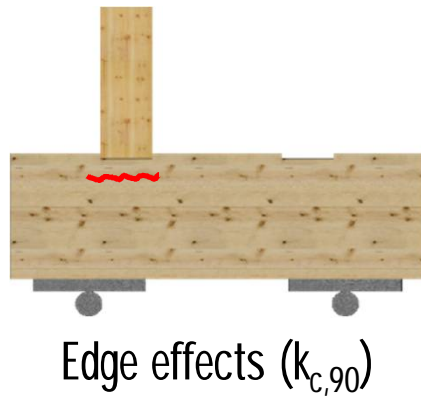
Experimental campaign joint tests : manufacturing the joints



Experimental campaign joint tests : fabrication

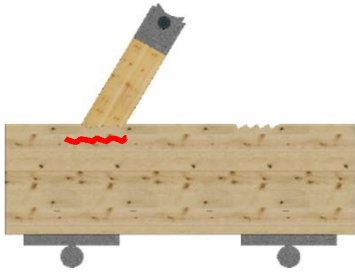
Members	Robot machining				CNC Machining			
	Entrait 30	Entrait 30	Arba 30	Arba 30	Entrait 30	Entrait 30	Arba 30	Arba 30
Size	A	B	A	B	A	B	A	B
Attended value [mm]	20,00	23,84	20,00	23,84	20,00	23,84	20,00	23,84
Mesured dimension [mm]								
1	20,32	22,96	19,98	23,93		23,76		23,82
2	20,09	24,33	19,92	23,97	20,00	23,78	20,00	23,87
3	19,50	24,30	20,01	23,99	20,01	23,78	19,94	23,83
4	19,78	23,31	20,01	23,01	20,11	23,80	19,99	23,83
5	20,14	24,30	19,98	23,90	20,01	23,74	19,95	23,87
6	19,54	23,83	19,85	23,90	20,03	23,76	19,94	24,00
7	20,66	23,48	20,05	24,04	20,02	23,75	19,94	23,96
8	19,35	24,37	19,97	23,94	20,04	23,84	19,92	23,88
9	19,56	23,90	19,90	23,94	20,00	23,87	19,97	23,87
10	20,62				19,99			
Average of deviations [mm]	0,41	0,36	0,06	0,20	0,03	0,06	0,04	0,05
Minimal precision [mm]	0,41				0,06			

Experimental campaign joint tests : test 1 edge effect

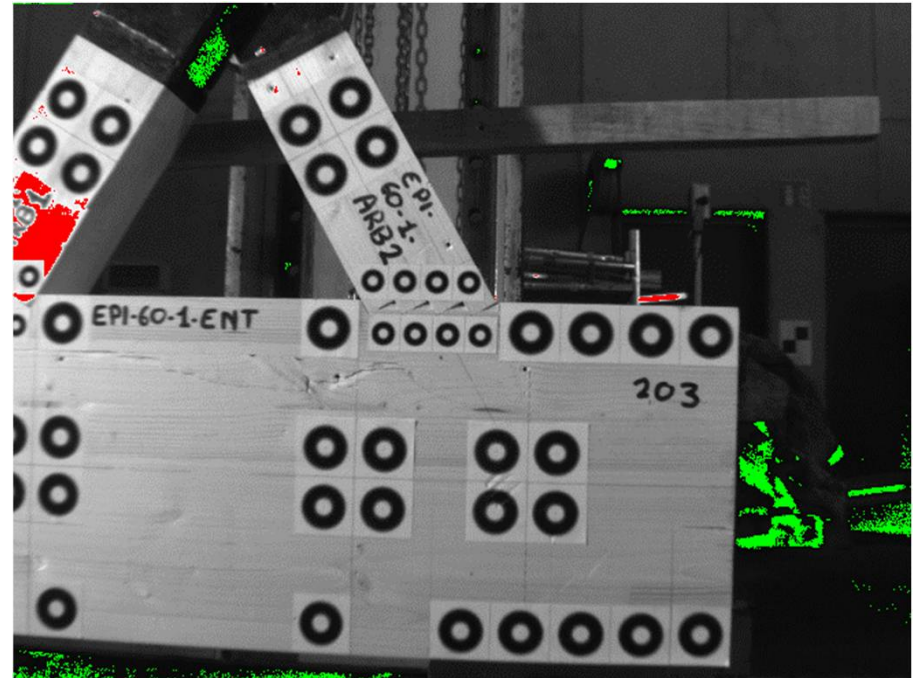


Classic normal compression perpendicular to the grain

Experimental campaign joint tests : test 2 transverse compression

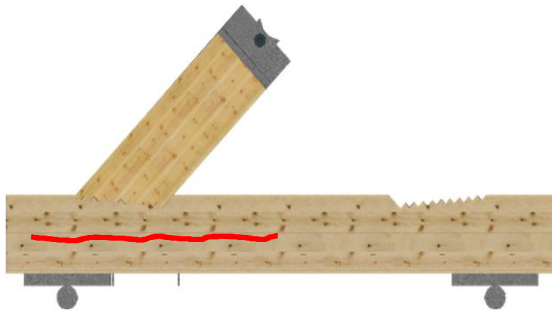


Transverse
compression ($f_{c,\alpha,k}$)

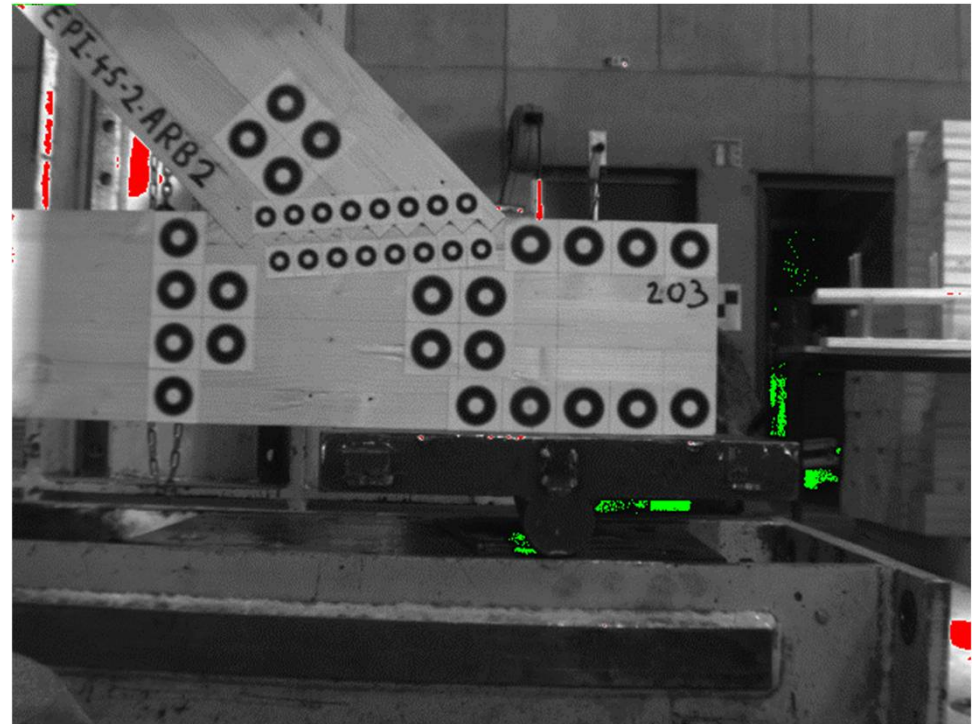


Classic compression at an angle
to the grain in the tie-beam

Experimental campaign joint tests : test 3 bending and shear

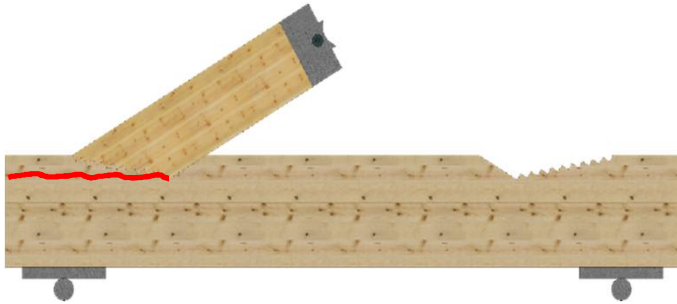


Bending/Shear in the reduced section (l_{ecc})

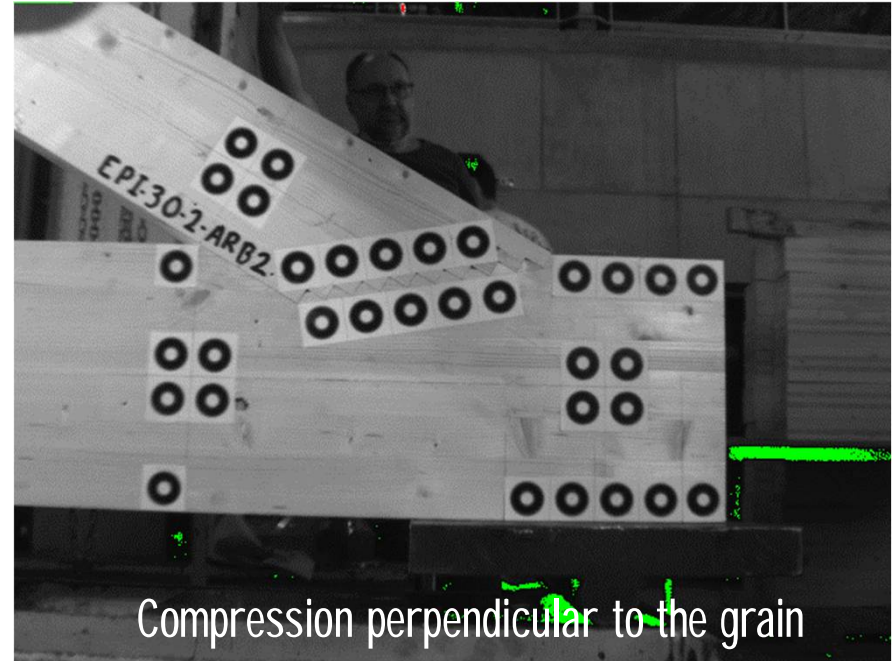


Classic beam shear under transversal compression in the tie beam : final failure in bending

Experimental campaign joint tests : test 3 bending and shear



Shear crack at the heel depth ($l_{v,eff}$ & $k_{v,red}$)

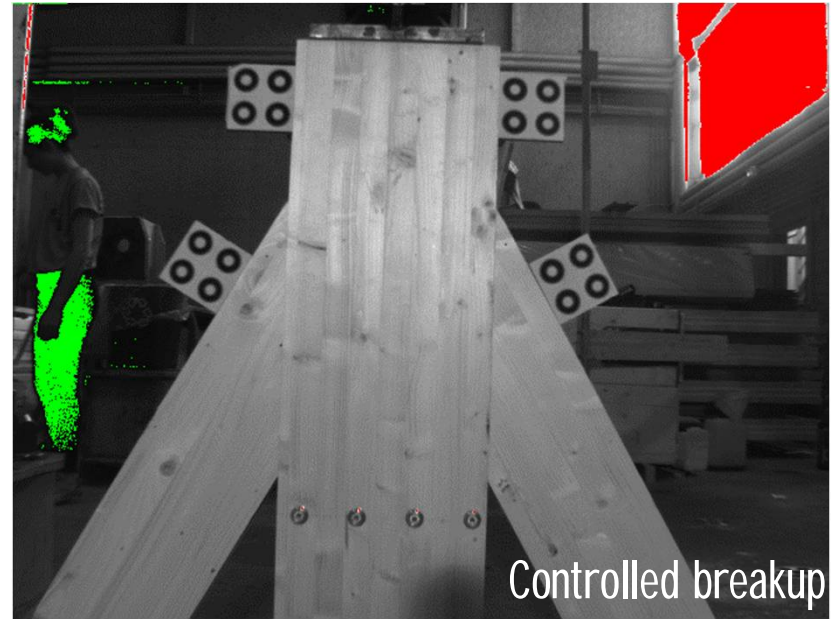
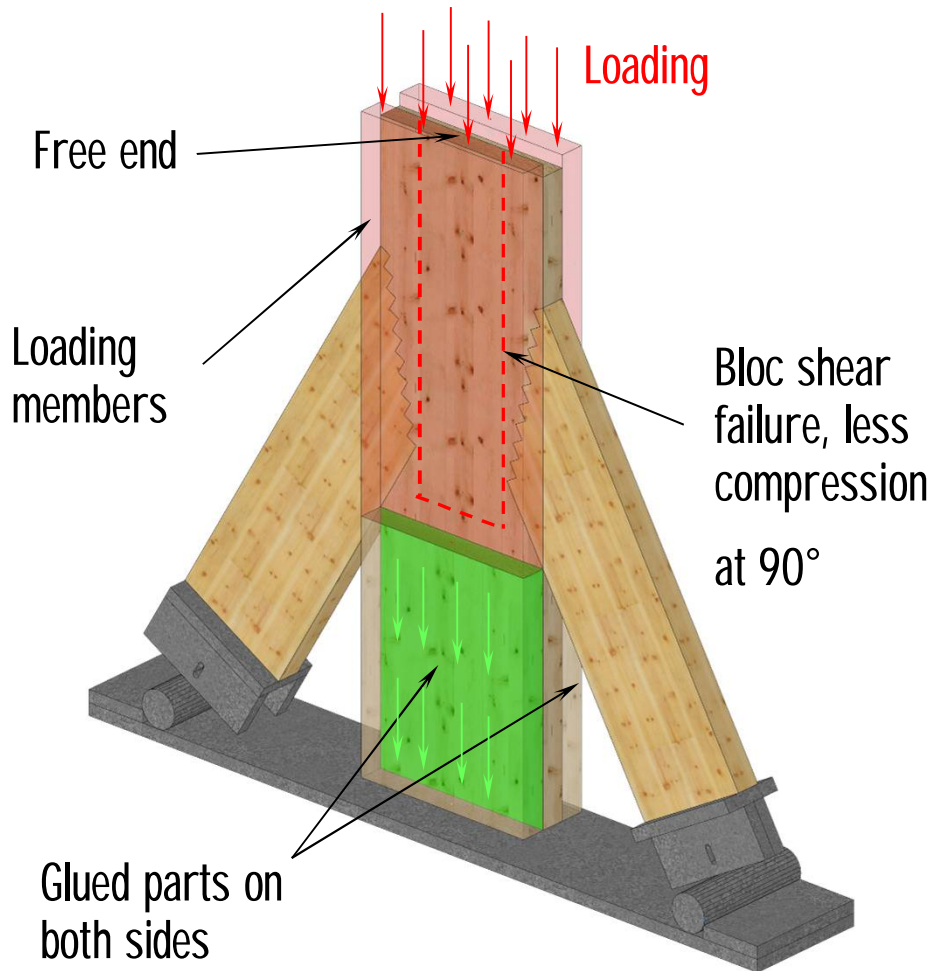


Compression perpendicular to the grain

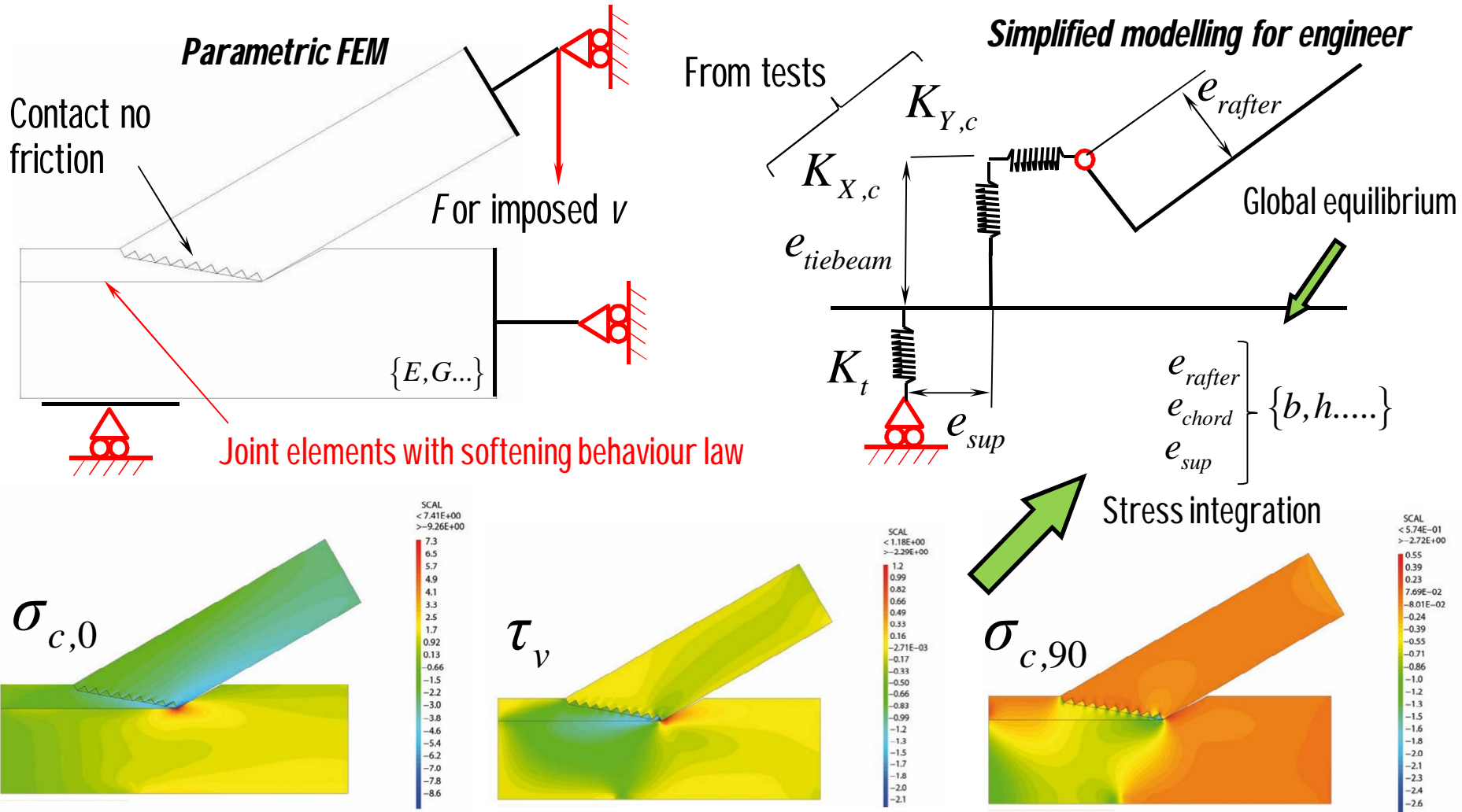
Classic heel shear failure

compression in the tie beam is very important

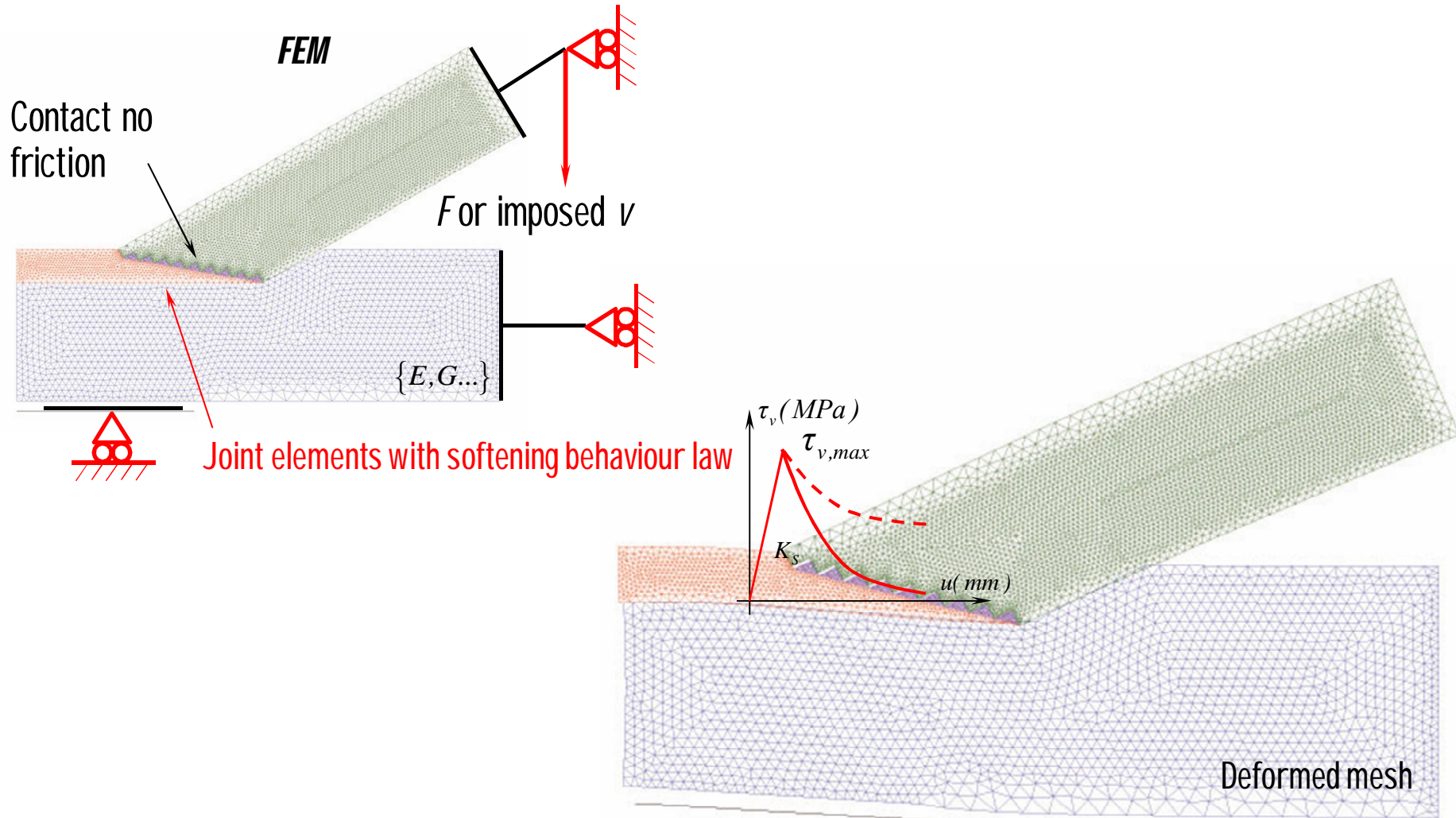
Experimental campaign joint tests : new test for shear



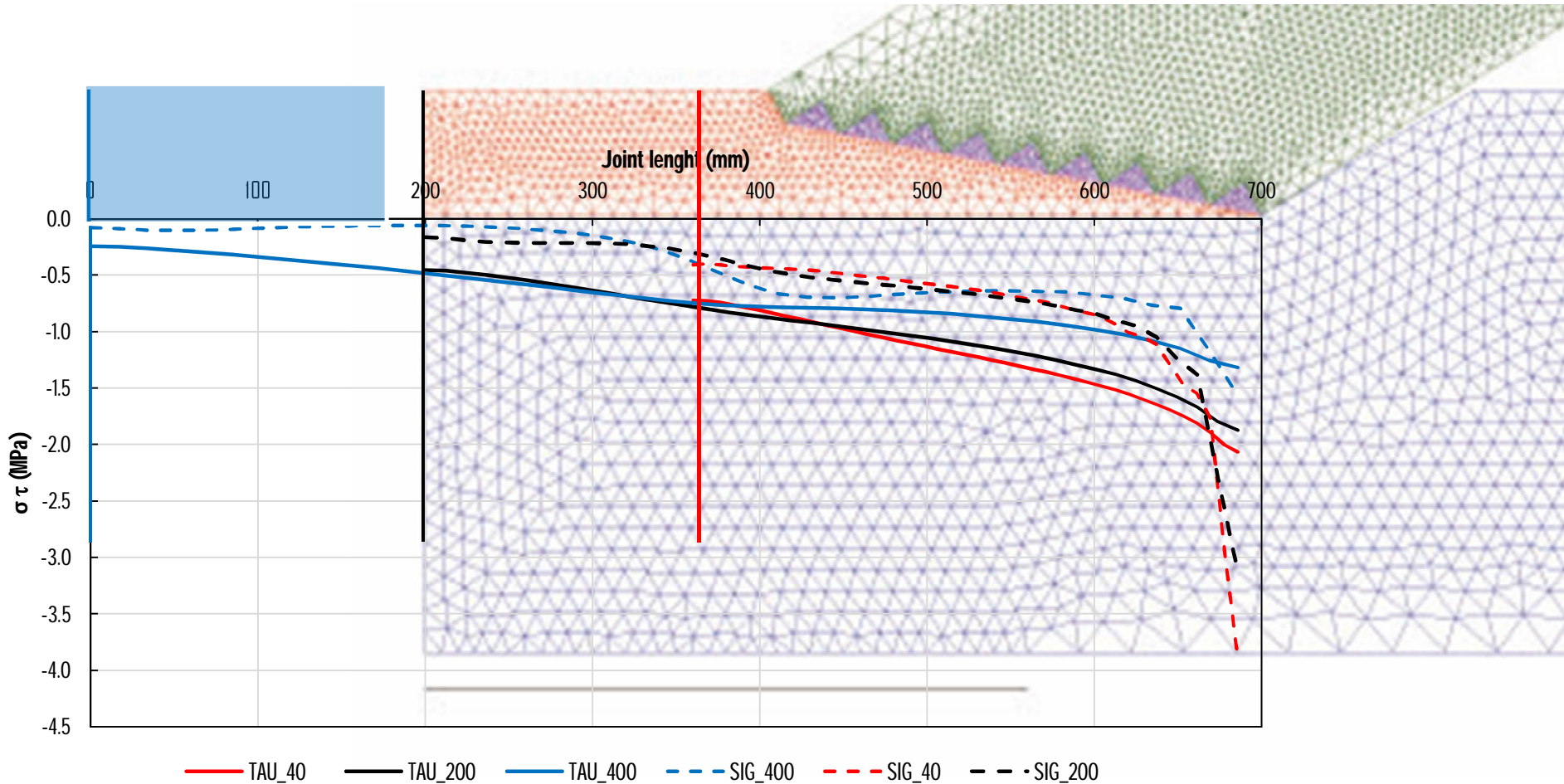
Experimental campaign joint tests : modelling with CASTEM



Experimental campaign joint tests : shear distribution



Experimental campaign joint tests : elastic shear distribution



LERMAB participation

WP4 – T4.3: Multiple Deep grooves – foam-beam model

- Objective: Establish design criteria for multiple deep grooves connection.
- Done: Parametric description and Cast3M elastic plastic model, machining the specimens, Abaqus parametric model for 2D compression test a any angle to the grain.
- Deliverable : French execution report on the compression tests campaign (done) and modelling done
- Perspectives: Programming the modelling of sample with an angle to the grain (done). Parametric programming of the deep groove timber assembly, conduct pre-tests with soft wood before doing tests for hardwood.



EU-Project ForestValue hardwood_joint

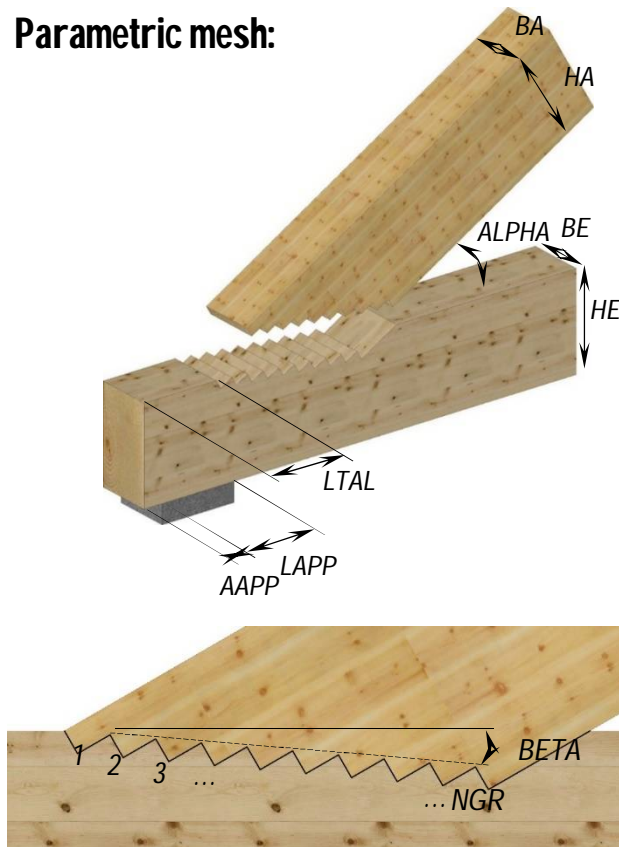
7th meeting | Online | 17-18 March 2022

5- MULTIPLE Deep grooves – DESIGN CRITERIA USE OF foam-beam model

Annabelle HOSPITAL and Jean-Francois BOCQUET

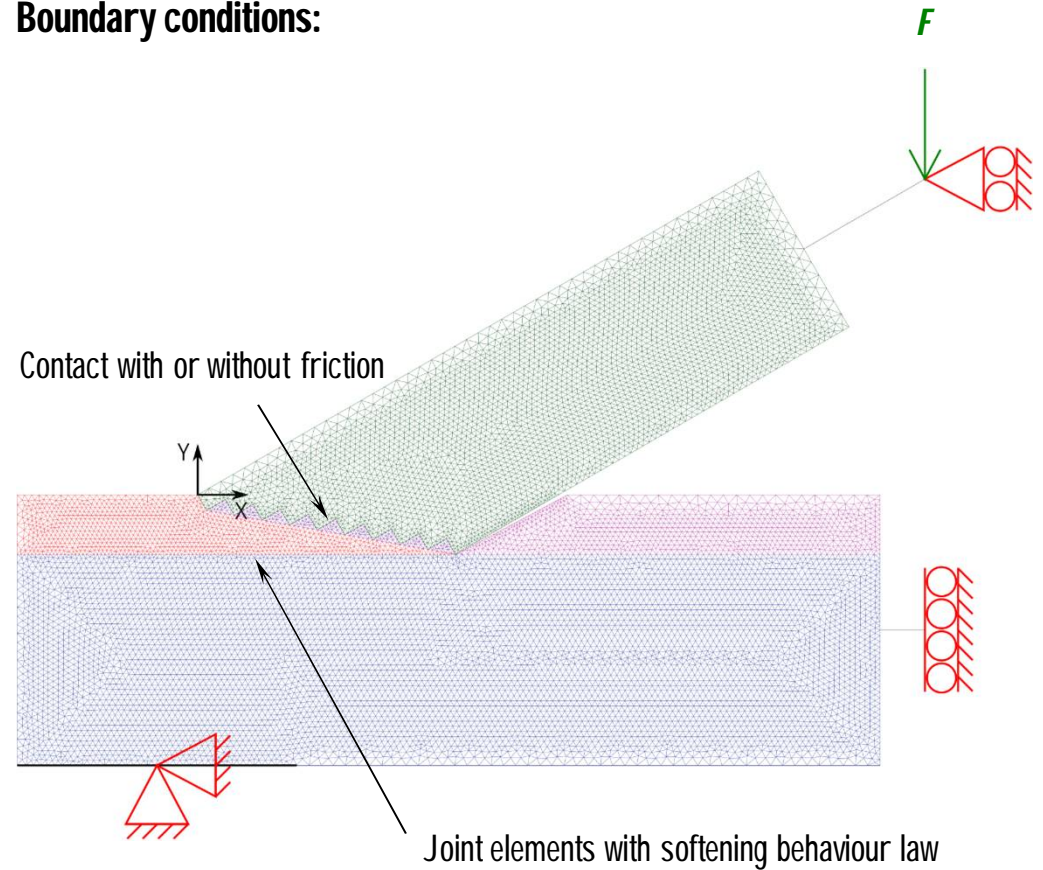
Experimental campaign joint tests: modelling with CASTEM

Parametric mesh:



+ Material properties

Boundary conditions:



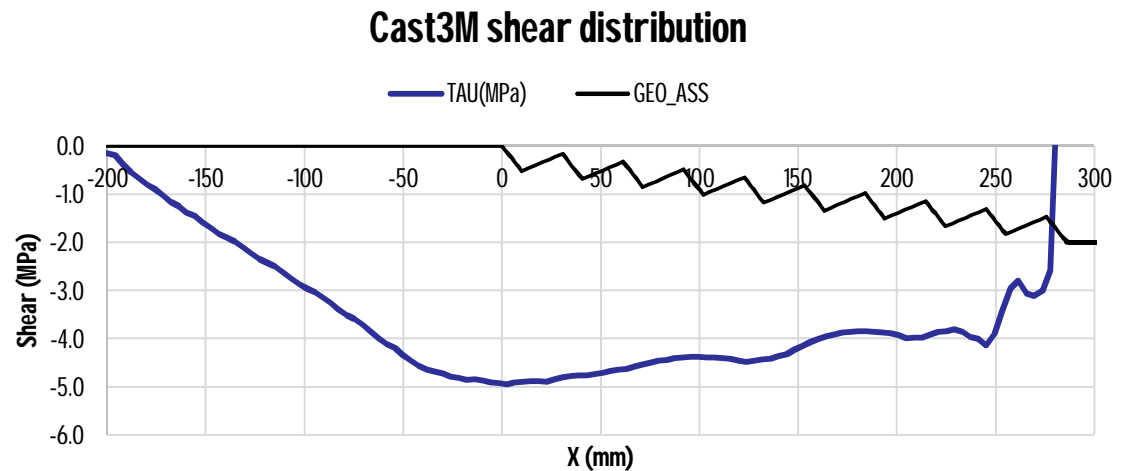
Experimental campaign joint tests: modelling with CASTEM

Validation with experimental joint tests with $\alpha = 30^\circ$



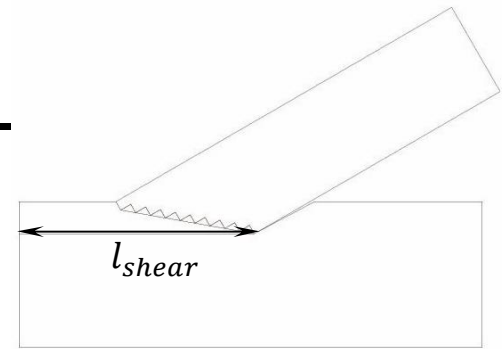
Shear crack at the heel depth
($l_{v,eff}$ & $k_{v,red}$)

	Nfail, Y (kN)
Test 1	146
Test 2	130
Cast3M	151



Effective length

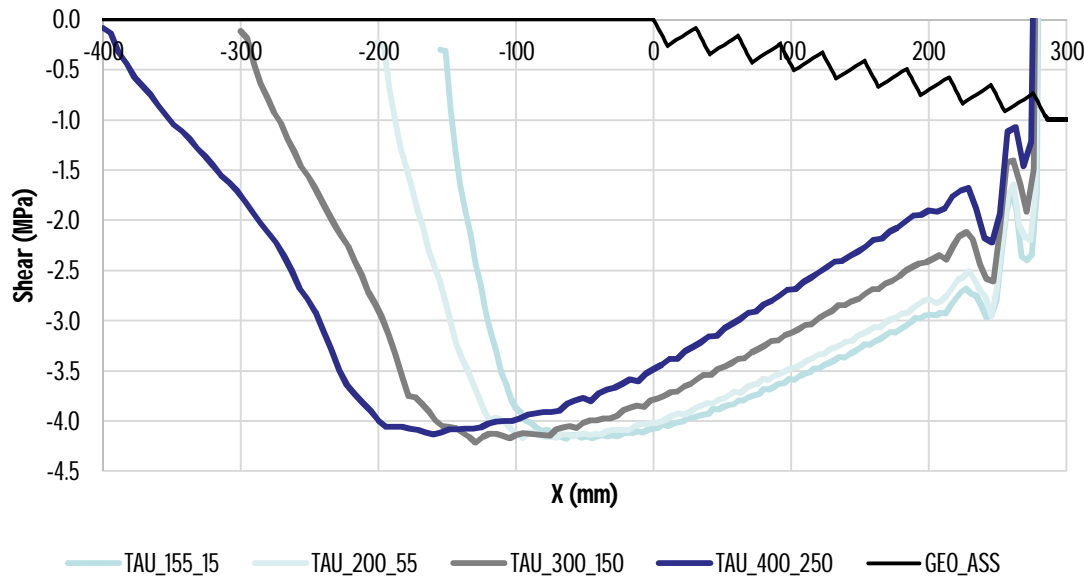
$$l_{v,eff} = \frac{N_{fail}}{f_{v,mean} \times BE} = \frac{BE \int_0^{l_{shear}} \tau \times dx}{f_{v,mean} \times b} = \frac{\int_0^{l_{shear}} \tau \times dx}{f_{v,mean}}$$



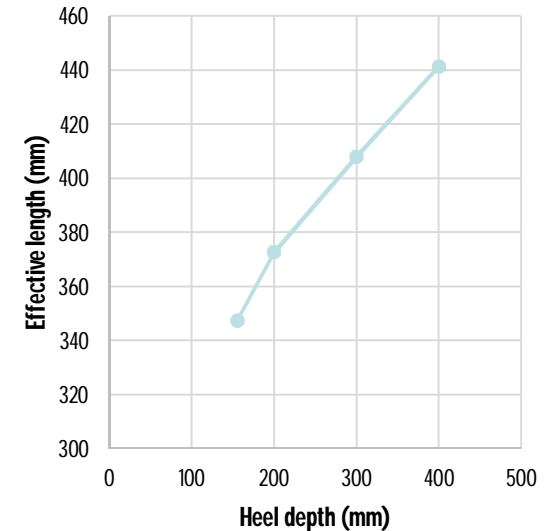
Thickness = BE

Parametric study: example with different heel depth and tie beam moment equal at zero

Shear distribution



Effective length



3 Caractérisation par essais de compression du comportement des bois feuillus

ForestValue

hardwood_joint

WP4 – Tâche 4.3

Etude préliminaire à la modélisation des embrèvements à pas multiple en bois feuillus : essais de compression à différents angles par rapport au fil

Dmitry PARRELL

2021



Avant-propos

Ce travail s'inscrit dans un projet européen ForestValue : le projet hardwood_joint – innovative joints in hardwoods. Ce projet réunit plusieurs équipes de recherche : l'équipe Timber Structures and Building Construction de l'Institut de technologie de Karlsruhe (Allemagne) qui est le coordinateur du projet, le Department of Building Technology de l'Université de Linnaeus (Suède), l'Institute of Timber Engineering and Wood Technology de l'Université de technologie de Graz (Autriche) et le Laboratoire d'Etude et de Recherche sur le MATériau Bois (LERMAB) de l'Université de Lorraine (France). La finalité du projet est de favoriser la construction de structures à haute performance en bois de feuillus dans le secteur européen du bâtiment, ceci en développant des technologies d'assemblages communes, économiques, fiables et innovantes. Afin d'atteindre cet objectif, des études mécaniques et thermiques sont menées sur trois essences de bois de feuillus : le chêne, le hêtre et le bouleau, ainsi que sur du LVL de hêtre.

Ce document résume un travail préparatoire à la modélisation du comportement non linéaire ductile et semi fragile des assemblages de type embrèvement à pas multiple par contact. Ce travail constitue un préalable qui permettra de figer les paramètres d'un modèle éléments finis hybride, en se basant sur une campagne d'essais de compression élémentaire à différents angles par rapport au fil. Ce rapport explique pourquoi une approche de modélisation hybride est retenue en se basant sur les travaux de thèse de Tavakoli [1]. Il présente également le protocole expérimental complet des essais de compression, la campagne d'essais, ses résultats. Bien que les travaux de modélisation paramétrique aient été réalisés et qu'ils conduisent aux comportements attendus, il n'a pas été possible dans le temps imparti de procéder à leur finalisation. La finalisation consistant à identifier les paramètres du modèle en se basant sur les résultats d'essais. Néanmoins tous les résultats sont présentés dans ce rapport et pourront être réutilisés ultérieurement pour achever ce travail.

L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), l'organisme France Bois Forêt (FBF) et le Comité Professionnel de Développement des Industries Françaises de l'Ameublement et du Bois (CODIFAB) participent au financement de la partie française du projet hardwood joint. De même, deux industriels français accompagnent ce projet, la société SIMONIN et la société Würth France.

Sommaire

1	Introduction	7
2	Bibliographie générale.....	8
3	Détermination des propriétés du modèle.....	14
3.1	Références normatives	14
3.2	Montage et dispositifs de mesure.....	14
3.3	Processus de fabrication des éprouvettes.....	16
3.4	Données d'essais complémentaires.....	21
3.5	Cycle de chargement	21
3.6	Méthode d'analyse des essais expérimentaux.....	21
3.7	Analyse statistique des données expérimentales	26
4	Résultats expérimentaux	28
4.1	Tableau de synthèse	28
4.2	Relation entre E_{40} et E_{60}	30
4.3	Relation entre le module d'élasticité et la masse volumique.....	31
4.4	Relation entre la résistance et la masse volumique.....	32
4.5	Relation entre le module d'élasticité et la résistance	33
4.6	Relation entre le module d'élasticité et l'angle entre effort et le fil du bois.....	33
4.7	Relation entre la résistance et l'angle entre effort et le fil du bois.....	35
4.8	Impact de l'orientation des cernes sur la résistance	38
4.9	Loi RICHARD ABBOTT	39
5	Conclusion	40
6	Références.....	43
Annexe A	Rappel sur la modélisation hybride du bois Thèse TAVAKOLI [1]	44
Annexe B	-Courbes expérimentales	70

Annexe C	– Valeurs remarquables pour chaque essai	139
Annexe D	– Histogrammes	149
Annexe E	- Courbes RICHARD ABBOTT	154

1 Introduction

L’embrèvement est un assemblage couramment utilisé en charpente traditionnelle. Réalisé à la main par des compagnons pendant très longtemps et encore maintenant dans bien des entreprises, il est présent dans la majorité des anciennes charpentes en Europe. Les efforts transitent entre les pièces par contact direct. La résistance de ces assemblages traditionnels repose essentiellement sur les capacités résistantes du matériaux bois en compression et en cisaillement. Dans les structures qui sont conçues avec ce type d’assemblage, la capacité est limitée par la résistance des assemblages plutôt que par la résistance des barres. Ces assemblages reconnus comme « traditionnels », avec des particularités propres à chaque pays n’avaient pas fait l’objet d’une harmonisation européenne des règles de dimensionnement afin d’être intégrées dans la première version du code de calcul Eurocode 5. Cette étape est en train d’être franchie pour la prochaine version de ce code de calcul.

La démocratisation et l’évolution des technologies de digitalisation de l’usinage de ces dernières années permettent des usinages de plus en plus précis. Ces évolutions permettent de repenser les assemblages traditionnels en multipliant notamment le nombre d’embrèvements entre les surfaces de contact des pièces, le but étant d’augmenter les surfaces comprimées et la longueur cisailée. Les embrèvements à pas multiple permettent donc de faire transiter plus d’efforts lorsque la qualité de la fabrication peut-être irréprochable. Pour le moment, il n’existe pas de règles adaptées pour effectuer le dimensionnement de l’évolution de cette technologie d’assemblage.

À ce jour, la majorité des structures en bois sont réalisées avec des bois résineux alors que dans certains pays, comme la France, la ressource est constituée en majorité de bois feuillus. L’augmentation croissante de la consommation de bois combinée à certaines maladies dont souffrent les bois résineux (épicéas scolytés) pousse obligatoirement les acteurs de la filière à s’intéresser à la valorisation des bois feuillus dans la construction.

Le projet européen de valorisation du bois feuillu Forest Value Hardwood Joint a ainsi, parmi ses objectifs d’étudier différents types d’assemblages particulièrement performants afin de permettre à terme, une meilleure valorisation de cette ressource actuellement peu utilisée en structure. Le but de cette étude est donc de proposer des critères de dimensionnement pour ces assemblages à pas multiple. Pour étudier le comportement de ces assemblages, le LERMAB propose de réaliser des modélisations informatiques (MEF) pour étudier et établir de manière paramétriques les lois de dimensionnement de ces assemblages. En effet, le nombre de paramètres étant importants et la réalisation d’essais sur ce type d’assemblages à taille réelle étant complexe et coûteuse, la campagne d’essais sur les différentes essences ne pourra être que limitée : la modélisation est là pour étendre numériquement la campagne d’essais. Pour définir le contour de la campagne d’essais expérimentale, il est tout d’abord choisi d’établir une note de calculs au regard de la bibliographie. Cette analyse permet de faire apparaître les manques de la littérature en termes de critère et permet de cerner les essais les plus intéressants à conduire.

Pour modéliser ces assemblages, il a été fait le choix d’utiliser dans un premier temps un modèle analogue à celui développé par TAVAKOLI [1] qui permet une représentation du bois à l’échelle macroscopique. Une présentation détaillée des principes de construction de ce type de modélisation est rappelée en annexe de ce document. Pour renseigner le modèle, il est nécessaire en premier lieu de produire les évolutions du comportement du bois en compression longitudinale et en compression transversale. Les bois feuillus étant assez peu utilisés en structure, les propriétés ne sont pas toutes connues pour les essences de bois étudiées dans le projet FOREST Value (chêne, hêtre, bouleau, LVL de hêtre). Préalablement à cette étude des assemblages, une campagne d’essais est conduite pour caractériser le module d’élasticité et la résistance des bois feuillus afin d’être par la suite implémentées dans le modèle numérique. Cette campagne d’essais sera également conduite sur des éprouvettes dont le sens du fil variera afin de pouvoir réaliser la détermination de paramètres d’interaction de contraintes dans les éléments de type Foam utilisé dans le modèle de TAVAKOLI.

2 Bibliographie générale

Selon l'étude de VERBIST [2], l'arrivée de nouvelles technologies a rendu possible des réalisations jusqu'alors trop fastidieuse car requérant une précision inatteignable avec les techniques traditionnelles de l'époque. Aussi, si les charpentiers pouvaient concevoir des embrèvements simples voire double, les embrèvements multiples avec un angle précis étaient inenvisageables en structure. Aujourd'hui, avec des machines telles que les Commandes Numériques (CN), ces usinages complexes sont à la portée du charpentier et peuvent être intégrés dans les conceptions de structure en bois. Néanmoins, il n'existe aucune équation définie dans le code de calcul pour qualifier la résistance de ce type d'assemblage. L'étude de VERBIST et BLASS propose des règles de conception, des recommandations géométriques et des règles de dimensionnement des embrèvements à pas multiples. Dans son étude, VERBIST a également réalisé des essais destructifs sur ce type d'embrèvements avec des paramètres différents (angle d'arbalétrier, profondeur d'entaille, largeur...) et décrit les modes de rupture rencontrés (la rupture au cisaillement du talon, la compression de l'entrait et la compression de l'about). Des critères de rupture sont proposés, mais ce type d'assemblage étant encore jeune dans l'état de l'art, la base de données d'essais expérimentaux demande à être complétée afin de figer des paramètres de dimensionnement.

L'analyse de la microstructure du bois permet d'établir un lien entre la qualité et la quantité des fibres avec la masse volumique. Des études expérimentales, telles que celle menée par GUITARD [3], mettent en valeur cette correspondance entre propriétés mécaniques et masse volumique dans les bois de résineux ; cependant les coefficients de corrélation sont moins bons pour des essences de feuillus. La masse volumique est un indicateur mais n'est pas d'une fiabilité absolue, la nature de l'essence de bois joue. D'autres facteurs interviennent dans la qualité du matériau : la nodosité, l'humidité, les fissures, l'âge du matériau (bois juvénile / bois mature), les effets du bois de réaction (bois de compression / de tension). L'une des propriétés anatomiques du bois les plus influentes sur les capacités mécaniques reste l'orientation du matériau considéré orthotrope selon le sens du fil.

Depuis l'avènement du calcul numérique, il n'a cessé d'être développé des modèles rhéologiques pour simuler le comportement des matériaux. Les matériaux « semblant » les plus homogènes comme les métaux ont tout d'abord été étudiés. Les très bons résultats obtenus ont conduit alors les chercheurs à transposer la méthodologie retenue, c'est-à-dire celle des milieux continus, à d'autres types de matériaux. Ces matériaux, évidemment moins homogènes, ont posé rapidement d'autres problématiques dont certaines ont été résolues, il est possible de citer par exemple l'anisotropie. Le bois est un de ces matériaux qui présente également la particularité d'être poreux. Suivant le comportement physique qu'il est souhaité être étudié, cette porosité pose différents problèmes. Dans le cas de la mécanique et de l'étude des déformations et des contraintes jusqu'à la rupture et même la phase qui vient après la rupture, c'est-à-dire la densification, il n'y a pas aujourd'hui de consensus scientifique sur l'approche à retenir. Du fait que le bois soit poreux, les hypothèses des milieux continus sont rapidement mises en défaut. D'autre part, les formulations issues des milieux continus et des formules dérivatives qui en découlent conduisent à requérir une multitude de paramètres dont l'identification est quasi impossible pour bon nombre d'entre eux en particulier dans le domaine linéaire. Si chaque paramètre de ces formulations revêt évidemment un sens mathématique au regard des formulations, en revanche, sur les phénomènes physiques à représenter, il est beaucoup moins évident que ceux-ci aient une importance fondamentale. C'est sur cette réflexion que Bocquet [12] a présenté en 1997, une approche autre. Cette approche est basée sur le fait que le bois n'est pas un matériau continu, c'est un arrangement de la matière qui confère à un volume donné, à une certaine échelle, le comportement d'un édifice, d'une structure. Une sollicitation induisant des efforts dans l'édifice, l'effondrement de l'édifice représente l'écoulement de la matière ayant atteint ses limites. La structure étant composée de quelques types d'éléments simples, les propriétés peuvent plus facilement être obtenus par des essais élémentaires. L'écart entre la réalité et la modélisation peut être établie. Le développement du modèle consiste alors à deviner par l'observation physique, quel comportement élémentaire devrait être ajouté. TAVAKOLI [1] dans son mémoire de thèse a fait évoluer le concept en établissant des modèles 2D et 3D. L'évolution consiste à retenir que le comportement du bois perpendiculairement au fil est équivalent à celui d'une mousse ou d'une structure poreuse type nid d'abeilles par sa capacité à ce densifier. Pour apporter l'anisotropie et le caractère très résistant du bois dans le sens du fil, le volume de mousse est renforcé par des poutres. La mousse agit alors comme un liant entre les poutres. Ce liant apporte une résistance au cisaillement entre les poutres, ce qui apporte en quelque part l'effet inertiel de la dimension aux parties modélisées. Ce

travail de recherche ayant été réalisé dans le cadre d'une structure privée, cette approche est restée confidentielle alors qu'elle est maintenant publique. Afin de faciliter la compréhension du lecteur et sa recherche, la présentation du concept et l'apport de TAVAKOLI [1] sont présentés par quelques pages de la thèse dans l'Annexe A.

Cette approche a été implémenté dans le logiciel de calcul Abaqus qui établit un calcul par éléments finis. Une fois ce modèle adapté pour la géométrie de l'assemblage, les déformations peuvent être modélisées au-delà même du domaine élastique en permettant de visualiser les différents types de rupture. La Figure 2-1 présente le maillage déformé ainsi que les contraintes pour deux seuils de chargement obtenu sur la modélisation d'un embrèvement avant.

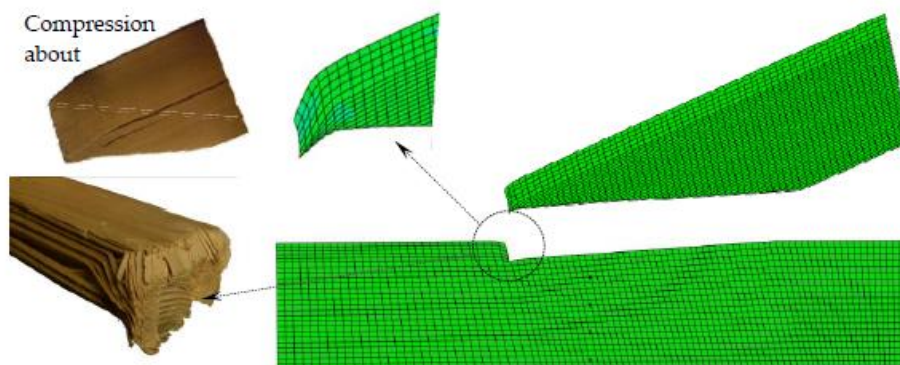


Figure 118 : Comparaison des modes de rupture d'un assemblage de fermes obtenus par MEF et par essais expérimentaux.

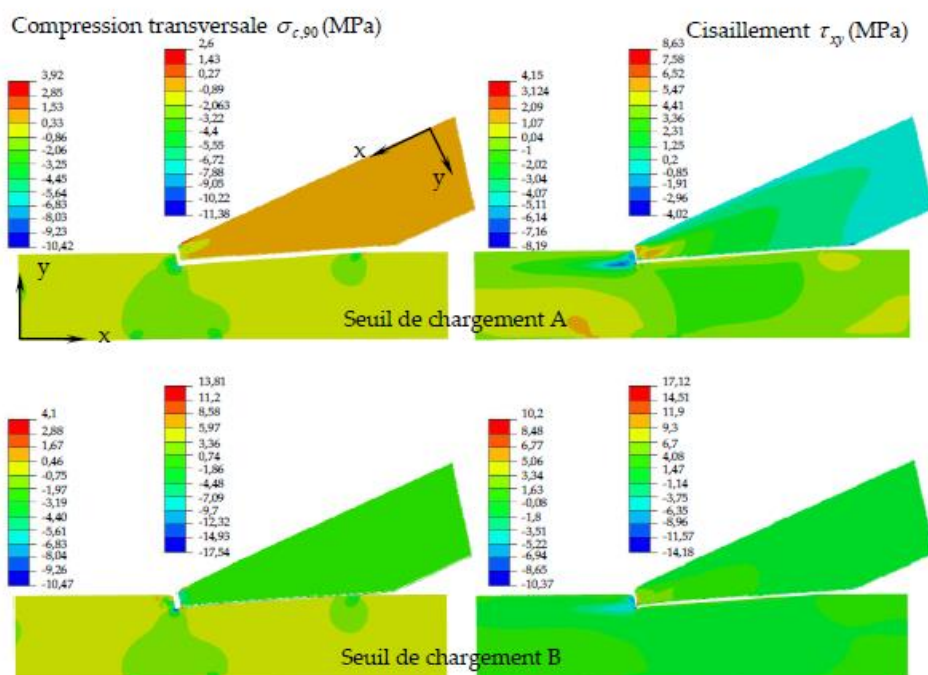


Figure 2-1 : Modélisation des déformations et approche des contraintes de compression et de cisaillement sur un assemblage par embrèvement avant bois-bois résineux TAVAKOLI [1] p177

Le comportement instable de l'effondrement de la matière est représenté et se traduit par une évolution non linéaire de la charge en fonction du déplacement. Il est possible de constater qu'il est nécessaire de considérer du frottement entre les surfaces en contact pour approcher le seuil de chargement maximum. La Figure 2-2 présente les résultats de la modélisation sur l'embrèvement présenté sur la figure précédente.

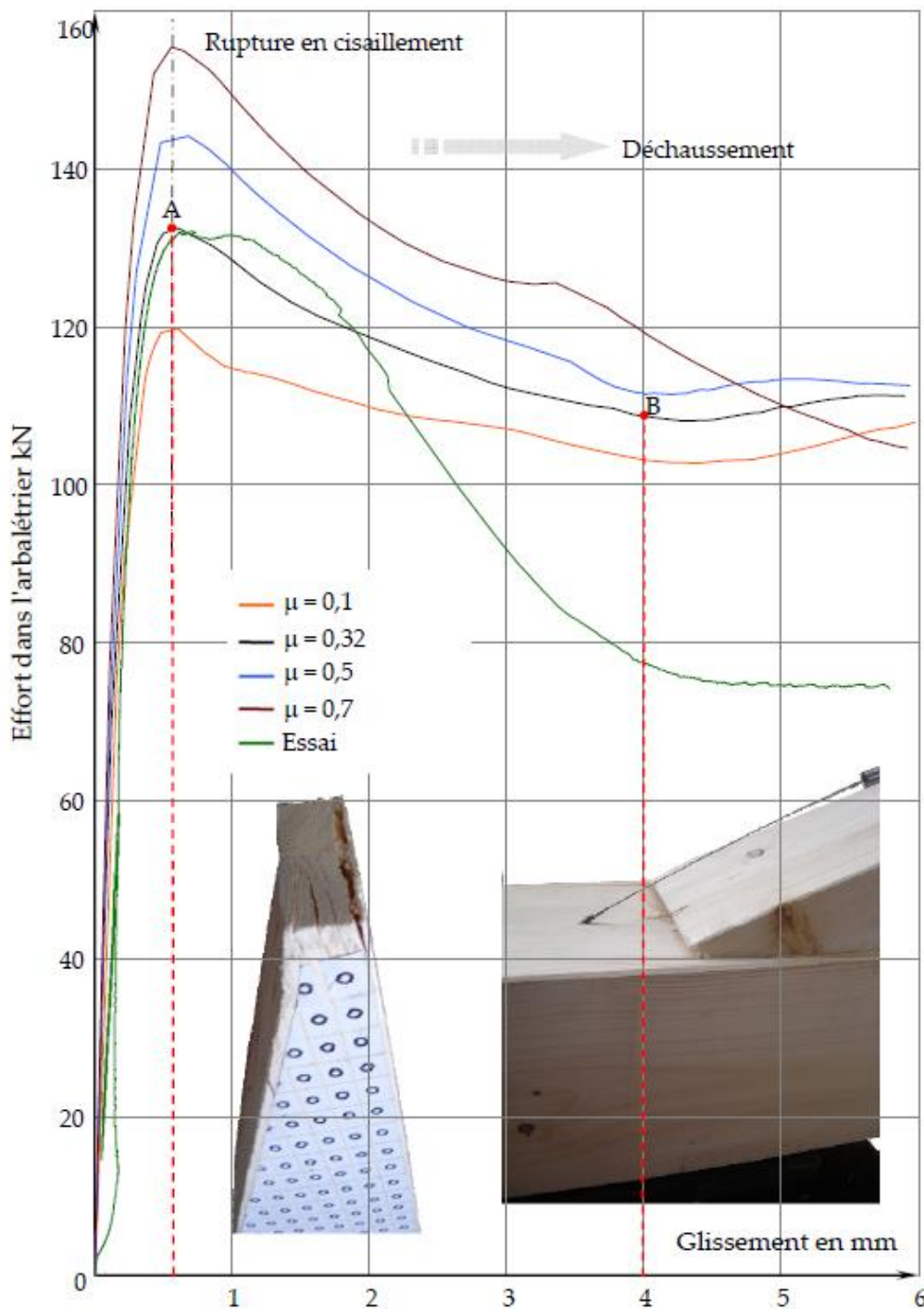


Figure 2-2 : Evolution de l'effort en fonction du glissement sur un assemblage par emboîtement avant obtenu par modélisation pour différent coefficient de frottement : comparaison avec un résultat d'essai TAVAKOLI [1] p178

Pour renseigner ce modèle qui apparait performant et suffisant dans le cadre de cette étude, il est nécessaire de connaître certaines caractéristiques des matériaux à modéliser :

- En premier lieu, il est nécessaire de connaître en valeur le module d'élasticité axial E_0 , élasticité transversale E_{90} , résistance en compression axiale $f_{c,0}$, en compression transversale $f_{c,90}$ et en cisaillement $f_{v,k}$. Aujourd'hui toutes ces valeurs ne sont pas parfaitement déterminées pour les matériaux étudiés dans le cadre du projet Forest Value.

- En second lieu, l'évolution du comportement transversal du bois est requise afin de renseigner les caractéristiques des éléments mousse ou Foam dans la modélisation.
- En dernier lieu, ce qui est le plus délicat, c'est d'identifier les paramètres k et k_t . Ces deux paramètres sont nécessaires à la représentation de l'écoulement de la mousse sans effet de Poisson et en particulier à la définition de l'interaction contrainte normale et cisaillement du critère de contrainte de la mousse.

Le bois de feuillu ayant été jusqu'à présent peu utilisé dans le domaine de la construction, les caractéristiques pré-citées sont peu présentes dans l'état de l'art. Il est possible d'en trouver un certain nombre dans les recherches conduites récemment par BENISTAND [4] mais toutes ne peuvent être déterminées.

Les paramètres k et k_t étant des paramètres de modélisation, ces paramètres ne peuvent être obtenus par mesure directe. Ceci n'est pas le cas de l'évolution de la contrainte de compression transversale en fonction de la déformation.

Au regard de ces constatations et des manques de données de la bibliographie sur les bois feuillu pour la modélisation, il est venu l'idée suivante : puisqu'il est nécessaire de pratiquer des essais de compression pour obtenir les caractéristiques de module, de résistance et la loi contrainte déformation, si ces essais sont également pratiqués à un angle par rapport au fil, la contrainte de compression ne sera plus seulement normale par rapport au sens des fibres. La compression engendrera également dans l'éprouvette de la compression normale perpendiculaire et du cisaillement. Par analyse inverse et ajustement, si les essais de compression sont simulés alors les paramètres k et k_t pourront également être déterminés. L'essai de compression est un essai relativement simple en termes de matériels car il ne nécessite pas de piloter plusieurs actionneurs pour atteindre un état de contrainte complexe. Cet essai requiert cependant de grande précaution d'usinage et un matériel de mesure très précis et adapté afin d'effectuer des essais interprétables.

Le fait d'obtenir une orientation de fil dans des éprouvettes de compression de petites tailles n'est pas très évident et pose un certain nombre de difficultés en termes d'usinage. Ainsi un travail préparatoire a permis de mettre au point, une dimension d'éprouvette et des formes qui conduisaient à des résultats reproductibles pour différents angles par rapport au fil. Des lots d'éprouvettes ont été usinées et testées pour arriver aux dimensions élémentaires de la Figure 2-3.

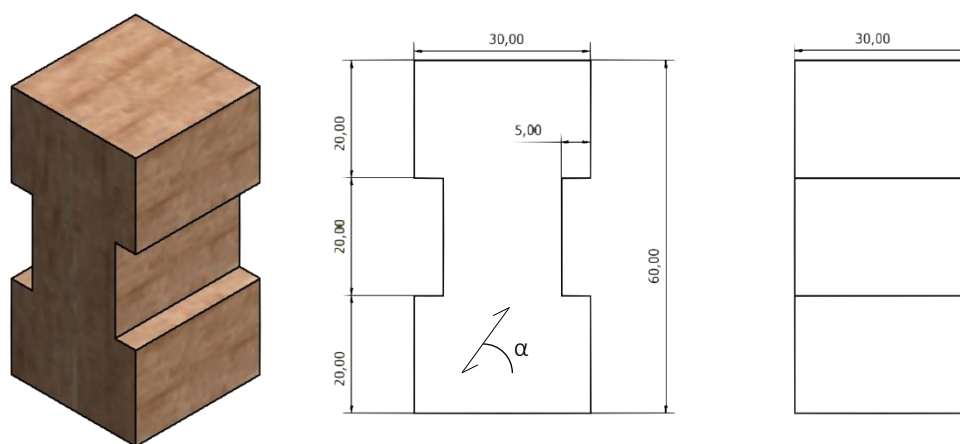


Figure 2-3 : Plans et dimensions élémentaires de l'éprouvette de compression de la campagne d'identification des paramètres du modèle structural

En regardant l'éprouvette sous sollicitation de compression, il apparaît que sur la profondeur de 30 mm, la contrainte est constante d'un point de vue théorique. Les éprouvettes ont alors été modélisée en 2D. La modélisation de l'éprouvette par une approche structurale n'est pas évidente sur un point qui est celui du maillage. En effet les poutres, idéalisant le sens du fil sont interrompues à différents endroits ce qui nécessite une description algorithmique complexe s'il est souhaité l'obtention d'un maillage complètement paramétrique. Pour faciliter cette approche, quatre angles ont été retenus au départ $0^\circ, 26^\circ, 56^\circ, 73^\circ$ et 90° : au fur et à mesure de la programmation ceci n'est plus apparu comme une limite, cependant ces angles ont été conservé comme valeur test pour la campagne d'essais. La Figure 2-4 présente le maillage des éprouvettes aux dimensions retenues et leur mode de rupture prévisionnelle.

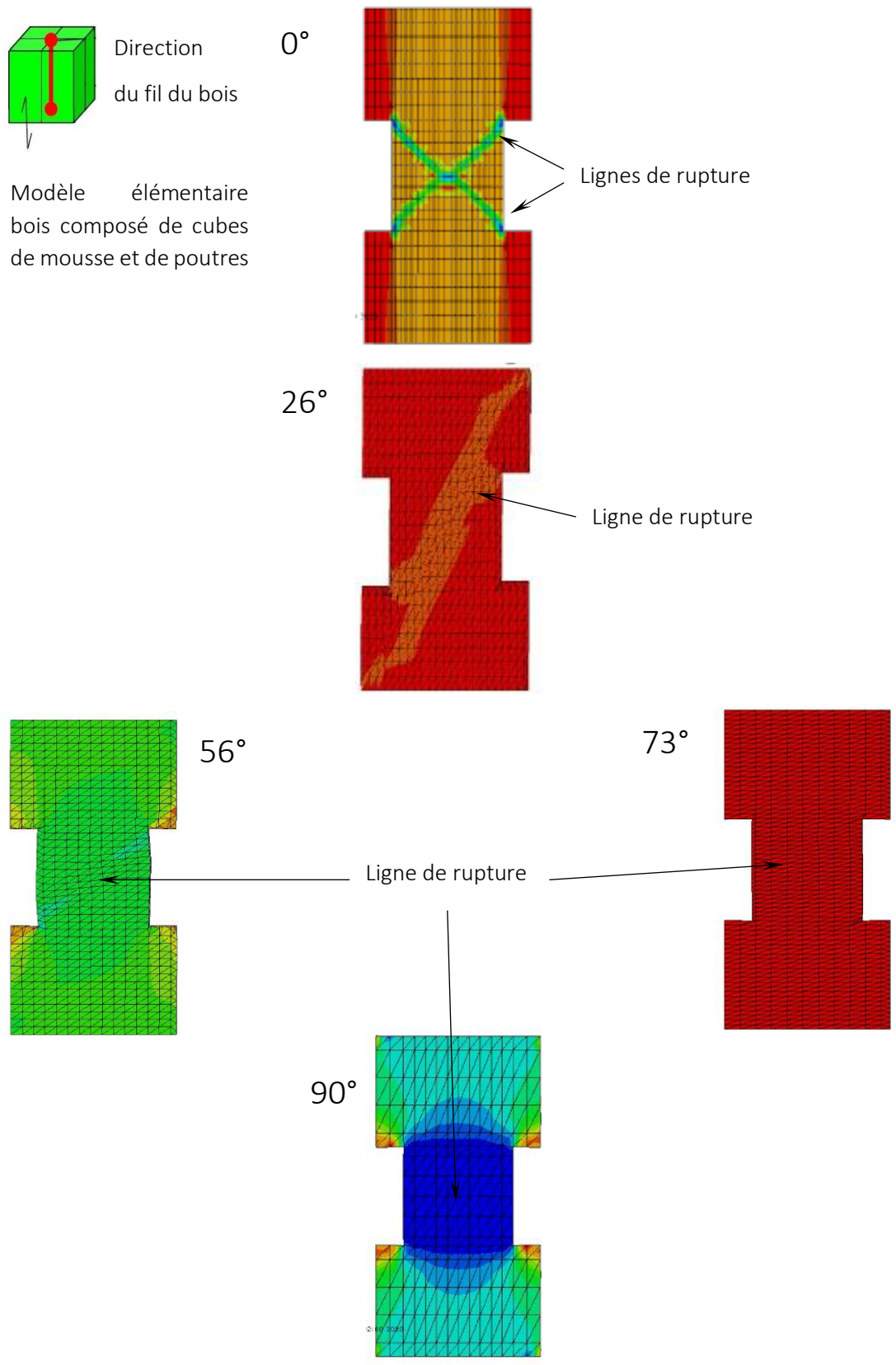


Figure 2-4 : Maillage déformé des éprouvettes de compression aux cinq angles par rapport au fil du bois, les lignes de rupture indique les zones d'effondrement du bois

En réalisant une campagne d'essais complète à différents angles, le modèle bois structurale pour le bois feuillu pourra être adapté pour prendre en compte au mieux les caractéristiques propres à chaque essence. En réalisant ces essais de compression à différents angles entre le sens du fil du bois et la charge appliquée, l'évolution de la résistance par rapport

à l'angle pourra être comparée avec le critère de NORRIS, utilisé par la norme de construction allemande DIN 1052 et à celui de HANKINSON, utilisé par la norme de construction européenne.

Après cette première étape de mise au point du modèle structurel, il s'est avéré nécessaire de modéliser les assemblages multi pas de manière paramétrique. Cette modélisation paramétrique doit permettre, une fois validée sur des résultats d'essais, d'étendre la base de données expérimentales et d'en tirer des règles de dimensionnement précises ce qui est le but visé par cette étude. Ces assemblages ayant une forte capacité, il a tout d'abord été réfléchi comment ces assemblages pouvaient être testés avec les moyens d'essais du Lermab. Il a aussi été réfléchi comment faire apparaître, en travaillant les configurations, les différents modes de rupture possibles de ces assemblages à haute performance. Cette phase de mise au point s'est effectuée en utilisant du bois résineux moins cher et plus facile à usiner. Cette phase s'est bien déroulée, elle est résumée dans le document « **Etude expérimentale et modélisation des assemblages à pas multiple** ». Pour modéliser ces essais et permettre l'extrapolation de la base de données, il faut être prudent dans la manière de modéliser afin de limiter la taille du modèle. Ainsi, il a été pris en compte en premier lieu les symétries qui peuvent facilement diviser la taille des problèmes par deux en posant les bonnes conditions aux limites. En second lieu, les parties ou les états de contraintes sont globalement maîtrisés et dont la distribution peut être approchée par la théorie des poutres sont modélisées par des éléments finis de type poutre. Le raccordement de ces poutres avec les zones à maillage structurale s'effectue à l'aide d'une poutre de jonction fictive à rigidité quasi infinie. La Figure 2-5 présente des maillages de la zone d'assemblage où les conditions aux limites de l'assemblage peuvent être changés. Ces maillages étant paramétrique, n'importe quel type d'assemblage peut être simulé.

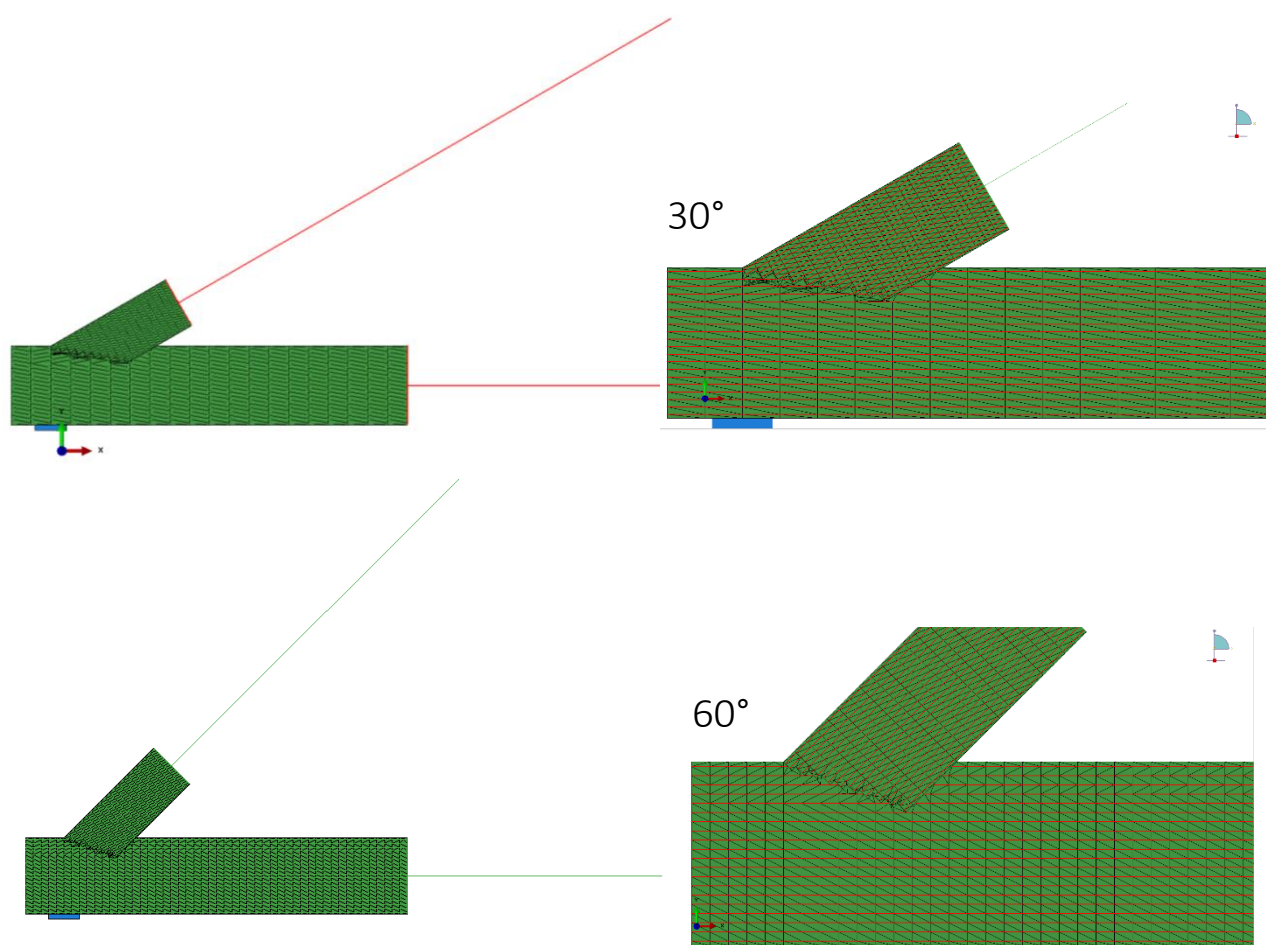


Figure 2-5 : Maillage de l'assemblage multi pas à deux angles par rapport au fil par approche structurale. Les parties courantes des éléments massifs en bois sont modélisés par

Cette modélisation prenant en compte le caractère non linéaire du bois en compression va permettre de poser la limite de résistance en compression des assemblages surtout pour les assemblages qui ont un angle important entre la pièce femelle et la pièce mâle.

Avant de passer au calage et à l'exploitation du modèle, il est nécessaire de passer par la phase expérimentale de caractérisation des matériaux qui fait l'objet des points suivants.

3 Détermination des propriétés du modèle

Comme il a été évoqué précédemment, les résistances et modules d'élasticité doivent être mesurés pour différents angles entre l'effort et le fil du bois pour être par la suite intégré dans le modèle élément finis. Ce chapitre présente la démarche d'échantillonnage suivie ainsi que le protocole des essais de compression mis en place pour mesurer ces propriétés.

3.1 Références normatives

L'élaboration du protocole expérimental est basée sur les exigences des normes européennes suivantes :

- ISO 554 : Spécifications sur les atmosphères normales de conditionnement et/ou d'essai [5]
- EN 384 : Bois de structure – Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et de la masse volumique [6]
- EN 13183 : Mesure de la teneur en humidité d'une pièce de bois scié [7]
- EN 14358 : Structure en bois – Détermination et vérification des valeurs caractéristiques [8]
- EN 408 : Bois de structure et bois lamellé-collé – détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques [9]

3.2 Montage et dispositifs de mesure

Le montage de compression qui a été utilisé lors des essais est celui présenté sur la Figure 3-1. Il est composé d'un support en acier permettant de guider verticalement le piston qui se trouve en contact avec la surface supérieure de l'éprouvette. Le montage comporte sur 3 côtés une enceinte de guidage parfaitement ajustée aux dimensions de l'éprouvette pour assurer un déplacement uniquement vertical au cours de l'essai. La face avant du montage est laissée libre pour suivre les déplacements de l'éprouvette afin de mesurer le module.

La mesure des efforts au niveau du point de chargement a été réalisée au moyen d'une cellule de force de 250 kN ayant une précision de (± 0.01 kN) en adéquation avec les spécifications fixées par la norme.

Les déplacements ont été enregistrés par une mesure optique par analyse d'images VDM¹ (précision de 0,01 mm). Ce système, basé sur le suivi de déplacement de cibles, permet de mesurer le déplacement relatif de deux objets (constitués d'une ou plusieurs cibles) les uns par rapport aux autres. La Figure 3-2 illustre la disposition de ces différents objets. Les

¹ Ce système de mesure a été développé par la société VIDEOMETRIC spécialiste de la numérisation 3D, de la mesure sans contact à très haute précision, <http://videometric.com/>

quatre cibles entourées en rouge représentent le plan de mesure commun à tous les essais. Pour chaque éprouvette, trois mesures de déplacements ont été réalisées :

- Déformation totale de l'éprouvette quantifiée grâce au déplacement du piston (objet 2). Cette mesure permet de confirmer l'ordre de grandeur des modules d'élasticité mesurés avec les autres objets, mais reste imprécise du fait du comportement entre le bois et l'acier aux interfaces de chargement.
- Déformation de l'ensemble de l'éprouvette mesurée avec le différentiel de déplacement des objets 3 et 4.
- Déformation de la zone critique mesurée avec le différentiel de déplacement des objets 5 et 6.

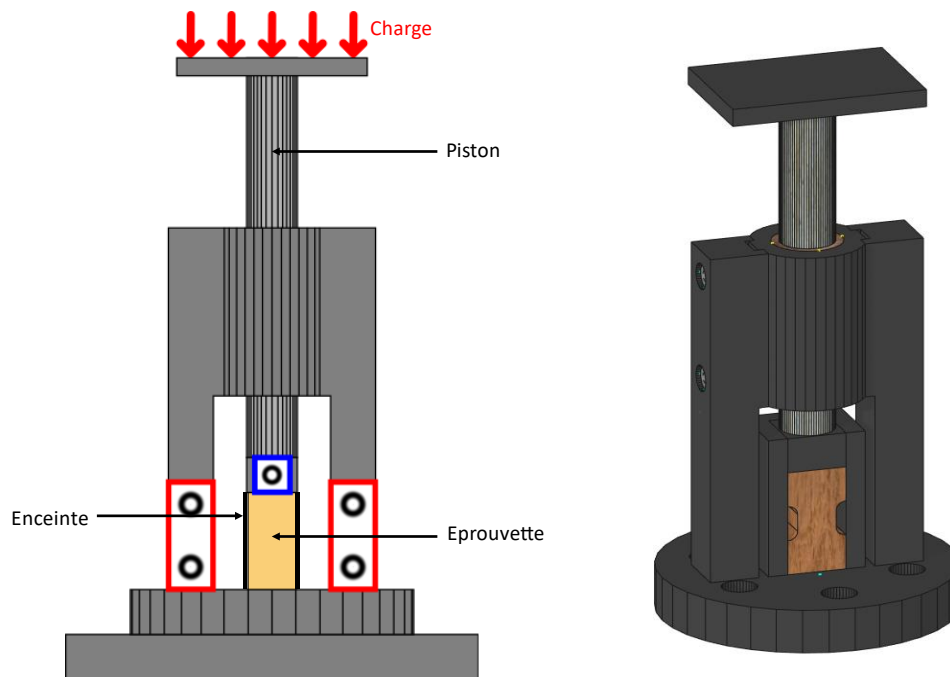


Figure 3-1 : Schéma du montage de compression

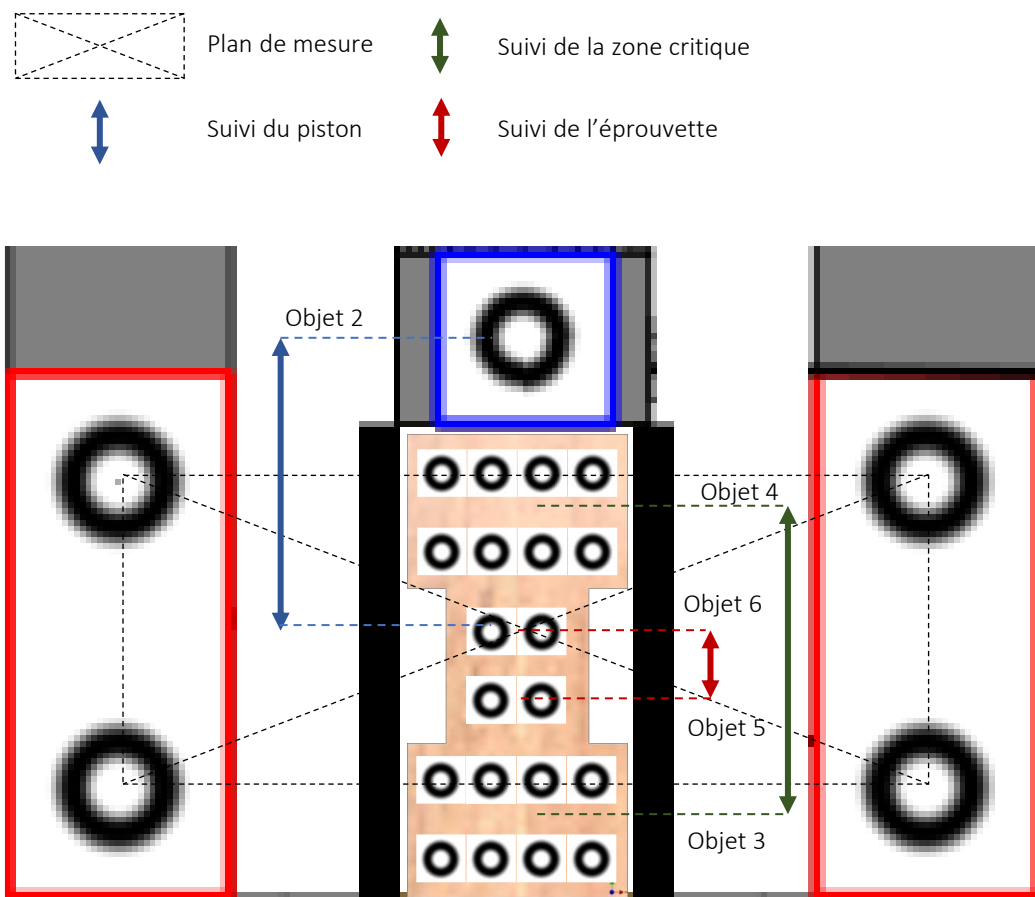


Figure 3-2 : Positionnement des cibles pour le suivi des déplacements de l'éprouvette

3.3 Processus de fabrication des éprouvettes

Les essais ont été effectués sur des éprouvettes de bois sans défaut pour les essences suivantes : bouleau, chêne et hêtre. Pour le hêtre, les essais ont été conduits sur du bois massif et sur du LVL à plis croisés fournis par la société POLLMEIER. Afin d'obtenir les effets d'interaction souhaités, les angles entre le fil du bois et la surface d'application de l'effort ont été fixés à 0°, 26,57°, 56,31°, 73,30° et 90°.

Le modèle développé par TAVAKOLI [1] ne prenant pas en compte de distinction entre la direction tangentielle et radiale, l'échantillonnage des éprouvettes a été réalisé selon la direction transversale, sans faire de distinction sur l'orientation des cernes du bois.

Les dimensions finales des éprouvettes (section carrée de 30 x 30 mm d'une hauteur de 60 mm) ont été fixée pour s'adapter au montage d'essais présenté précédemment. Selon l'ISO 554 [5] les bois ont été conditionnés sous une atmosphère normalisée de 20°C et 65 % d'humidité relative avant l'usage, afin qu'il soit à une teneur en eau proche de 12 %. Pour valider la stabilisation, des relevés ont été effectués tous les deux jours afin de suivre l'évolution de la teneur en eau des planches, lorsque la variation entre trois pesées consécutives était inférieure à 0,1 % de la masse totale alors l'humidité était considérée comme stabilisée.

Les panneaux de LVL Q de 42mm à disposition ayant deux plis transversaux, ceux-ci ont été débités en planches puis rabotés jusqu'à retirer ces plis transversaux pour ne conserver que les plis longitudinaux. Les planches ont ensuite été recollées avec de la colle néoprène pour obtenir les dimensions de l'éprouvette souhaitée.

Chaque série d'essais a donc comporté une trentaine d'éprouvettes qui ont été fabriquées selon les étapes suivantes :

- Tronçonnage, dégauchissage, rabotage des planches pour obtenir une épaisseur finale de 37 mm.
- Perçages de trous supports de 4 mm de diamètre et 35 mm de profondeur des planches à l'aide d'une machine à Commande Numérique. Ces trous supports sont présents dans les blocs de maintien présentés sur la Figure 3-3.
- Rabotage des planches à une épaisseur 30 mm,
- Vissage sur un panneau support avec des vis 5x40 afin de permettre l'usinage en série des éprouvettes,
- Usinage des éprouvettes sur centre de taille numérique, puis dévissage des éprouvettes,
- Numérotation des éprouvettes,
- Finalisation des éprouvettes sur une toupie à l'aide d'un montage d'usinage.

3.3.1 Usinage avec la commande numérique

Pour usiner la forme finale des éprouvettes de compression (Figure 3-3) il a été utilisé un centre numérique d'usinage une lame de scie et une fraise de 10mm de diamètre. La zone centrale (en rouge sur la figure) ayant été usinée avec la fraise, un congé de 5mm de rayon demeure dans la géométrie finale des éprouvettes.

Pour assurer le parfait maintien des éprouvettes lors des différents usinages, les éprouvettes ont été vissées dans un panneau servant de support. Pour ne pas impacter le comportement mécanique lors des essais, les vis de maintien ont été fixées dans deux excroissances situées de part et d'autre de l'éprouvette qui sont appelées « bloc de support » (en vert dans la figure). Le plus petit outil disponible pour percer avec une pointe conique ayant un diamètre de 5mm afin de ne pas causer de fissuration, il a été choisi un outil de 4 mm à pointe plate pour réaliser le perçage des blocs de support. Pour limiter les éclats sur la face sortante du fait de l'about plat de l'outils, les perçages n'ont pas été débouchant sur les planches de 37mm d'épaisseur. C'est en pratiquant le rabotage final des planches à une épaisseur de 30mm que le brut a été finalisé.

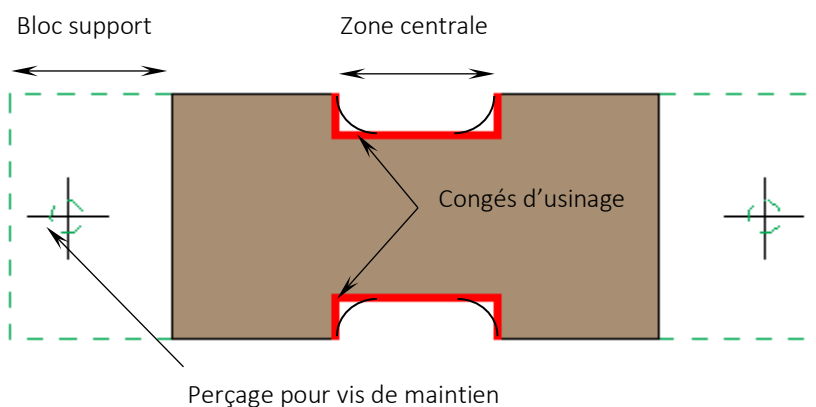


Figure 3-3 : Géométrie de l'éprouvette avec ses blocs de support

Pour limiter le temps d'usinage, il a été choisi de placer les éprouvettes de telle sorte que la CN découpe un maximum d'éprouvette par usinage en ligne droite. Un exemple de plan de découpe des différentes éprouvettes est présenté sur la Figure 3-4, chaque éprouvette étant séparée les unes des autres d'une distance de 3 mm équivalente à la largeur du trait de scie final.

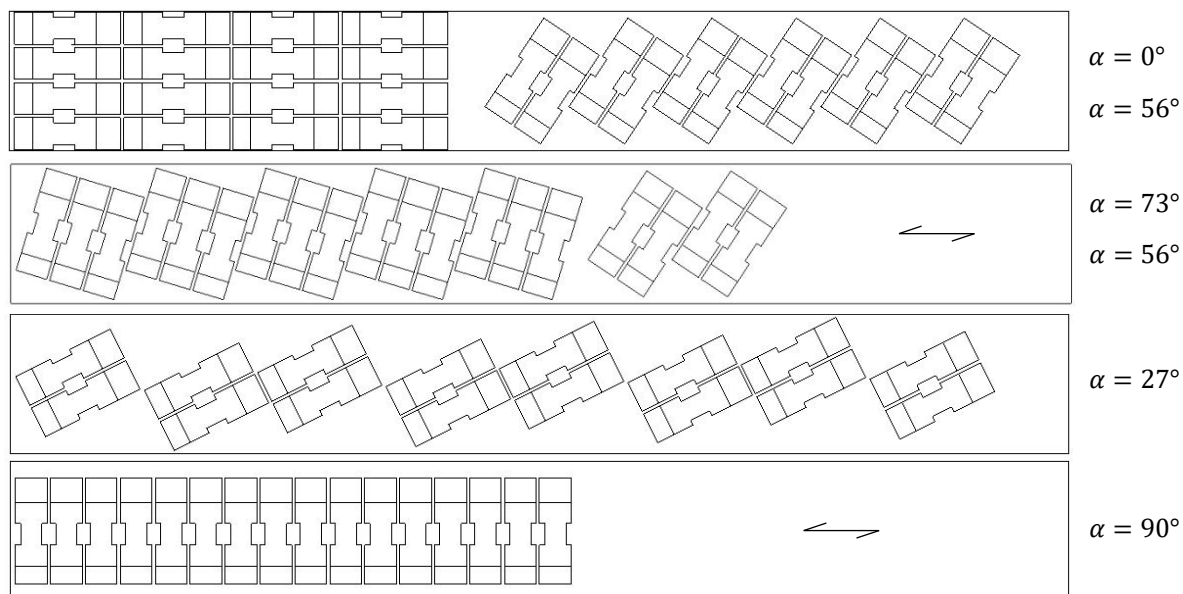


Figure 3-4 : Plan de découpe des éprouvettes suivant la direction du fil souhaitée.

3.3.2 Finalisation des éprouvettes

Pour obtenir deux surfaces parfaitement parallèles afin d'éviter l'introduction d'efforts parasites lors de l'essai de compression, un dernier usinage a été réalisé sur les éprouvettes avant essai sur une toupie équipée de deux lames de scies circulaires espacées de la hauteur finie de l'éprouvette. Cet usinage permet d'obtenir des états de surface également très propre du fait de la vitesse idéale des lames de scie.

Pour réaliser l'usinage, les éprouvettes sont placées sur un montage d'usinage (Figure 3-5) et sont maintenues par une sangle faisant le tour du montage. Le montage est composé des éléments suivants :

- Un plateau poncé sur la face qui glisse sur la table de la toupie et avec la face opposée rabotée de sorte qu'elle soit parallèle au plan de travail de la toupie ;
- Un bloc principal vissé sur le plateau avec deux tire-fond. Avant le serrage définitif des tirefonds, un premier passage sur la toupie a été réalisé et la position du bloc a été ajustée avec un comparateur de tel sorte que le bloc soit parallèle au guide vertical de la toupie.
- Un deuxième bloc de soutien fixé sur le bloc principal servant de support à l'éprouvette lors de l'usinage. Ce bloc a été fixé après vérification de l'orthogonalité entre le bloc de soutien et le plateau de support. Un pare éclat est mis en place avant l'usinage de chaque série d'essais pour assurer une parfaite qualité des surfaces d'appui.

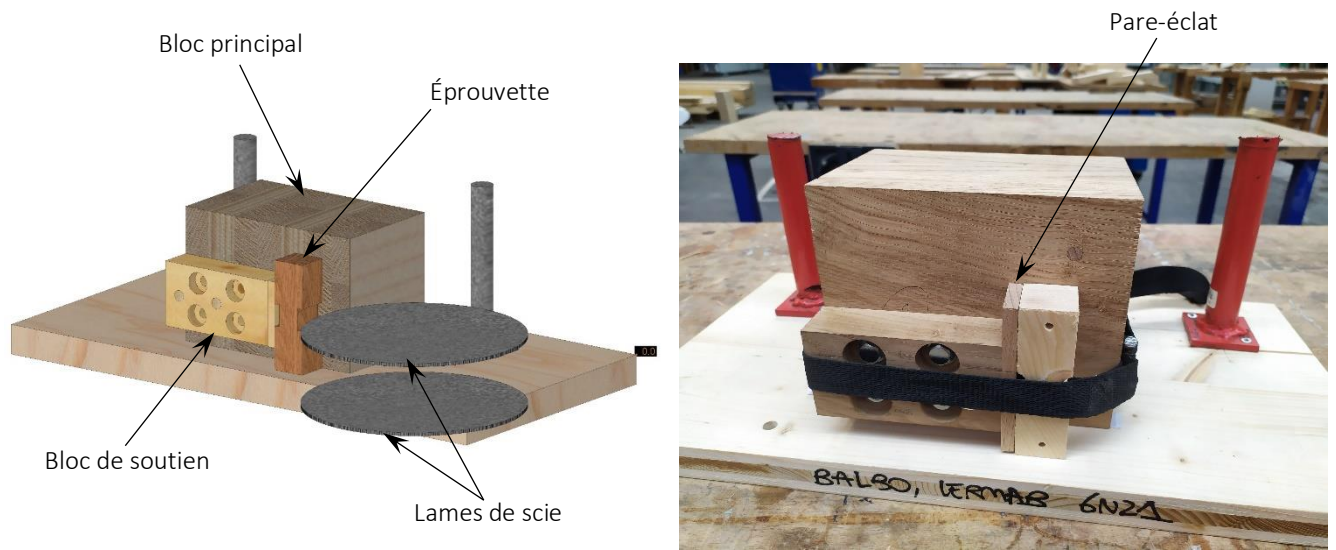


Figure 3-5 : Montage d'usinage pour la découpe des blocs résiduels

3.4 Données d'essais complémentaires

Avant les essais, les dimensions des éprouvettes ont été mesurées à partir d'une moyenne de 2 mesures de toutes les dimensions prises à chaque extrémité avec un pied à coulisse numérique GARANT DC2 précis à 0,01 mm. Le volume théorique d'une éprouvette est de 48 644 mm³.

La masse des échantillons a été mesurée juste avant les essais sur une balance précise à 0,01 g. Cette masse combinée aux dimensions a permis d'évaluer la masse volumique de chaque éprouvette.

L'humidité des bois a été mesurée par méthode dessicative selon la norme NF EN 13183-1 [7]. Le séchage a été réalisé sous une ambiance de 103 ± 2 °C. La stabilisation est atteinte lorsque la différence de masse entre deux pesées est inférieure à 0,1% (précision de 0,01 g), avec une durée minimale de séchage de 24 heures.

3.5 Cycle de chargement

Les essais ont été réalisés avec un déplacement imposé à vitesse constante de 1mm/min jusqu'à atteindre 5 mm de déplacement. Pour les essais avec un angle de 0° ou de 27° entre l'effort et le fil du bois, une chute de 40% de l'effort maximal mesuré a conduit à interrompre l'essais avant d'atteindre les 5mm de déplacement.

3.6 Méthode d'analyse des essais expérimentaux

3.6.1 Synchronisation des données force et déplacement

Le début de l'acquisition des déplacements mesurés par la caméra et la mesure de la force par la machine d'essais est synchronisée au moyen du déclenchement d'un signal électrique dénommé Trigger. Si les fréquences d'acquisition des données sont initialement fixées à 5Hz il est courant d'observer une légère dérive de la période entre deux images au niveau de la caméra. Cette dérive est inexistante au niveau des mesures de la force provenant de la machine d'essais universelle.

Les données de force et de déplacement ont été synchronisées en post traitement sur l'ensemble de la durée de l'essai. Pour corriger les données expérimentales, une interpolation linéaire est réalisée, selon le Table 3-1, entre pas de temps successifs pour recaler les forces et déplacements selon le pas de temps fixe de 0.2s.

Table 3-1 Méthode d'interpolation linéaire pour corriger la dérive du pas de temps des mesures.

t_f	F	t_δ	δ	t	F_{sync}	δ_{sync}
$t_{f,1}$	F_1	$t_{\delta,1}$	δ_1	t_1	$F_1 + \frac{(F_2 - F_1)}{(t_{f,2} - t_{f,1})} (t_1 - t_{f,1})$	$\delta_1 + \frac{(\delta_2 - \delta_1)}{(t_{\delta,2} - t_{\delta,1})} (t_1 - t_{\delta,1})$
$t_{f,2}$	F_2	$t_{\delta,2}$	δ_2	$t_2 = t_1 + 0.2$	$F_1 + \frac{(F_2 - F_1)}{(t_{f,3} - t_{f,2})} (t_2 - t_{f,2})$	$\delta_2 + \frac{(\delta_3 - \delta_2)}{(t_{\delta,3} - t_{\delta,2})} (t_2 - t_{\delta,2})$
$t_{f,i}$	F_i	$t_{\delta,i}$	δ_i	$t_i = t_{i-1} + 0.2$	$F_i + \frac{(F_{i+1} - F_i)}{(t_{f,i+1} - t_{f,i})} (t_i - t_{f,i})$	$\delta_i + \frac{(\delta_{i+1} - \delta_i)}{(t_{\delta,i+1} - t_{\delta,i})} (t_i - t_{\delta,i})$

t_f : Temps de la mesure de la force

t : Pas de temps fixe de 0,2s

F : Valeur de la force mesurée

F_{sync} : Valeur de la force synchronisée sur le pas de temps fixe

t_δ : Temps de la mesure du déplacement

δ_{sync} : Valeur du déplacement synchronisé sur le pas de temps fixe

δ : Valeur de déplacement mesuré

3.6.2 Exploitation des courbes d'essais

Une courbe Force-déplacement type des essais de compression pour différents angles est donné en Figure 3-6. Les forces mesurées F [N] ont été converties en contrainte dans la zone critique σ_c [MPa] en fonction de l'épaisseur des éprouvettes t [mm] et de la largeur de la zone critique l_{zc} [mm]. Pour chaque éprouvette et pour chaque mesure de déplacement il a été mesuré :

F_{max} : Effort maximal appliqué au cours de l'essai de compression

E_{40} : Module d'élasticité entre 10 et 40% de la charge F_{max} obtenue par régression linéaire entre ces deux bornes, exprimée en **MPa**.

E_{60} : Module d'élasticité entre 10 et 60% de la charge F_{max} obtenue par régression linéaire entre ces deux bornes, exprimée en **MPa**.

E_{pl} : Module d'élasticité de la phase plastique mesuré entre 2,5mm d'écrasement et le déplacement mesuré en fin d'essai. Le module est obtenu par régression linéaire entre ces deux bornes, exprimée en **MPa**.

F_{inter} : Effort de compression à l'intersection de E_{40} et E_{pl} obtenue à partir des équations des deux droites.

F_{offset} : Effort de compression lue sur la courbe d'essais en décalant la droite de E_{40} d'un déplacement de 0,01 fois la hauteur de l'éprouvette.

Les courbes et les paramètres calculés pour chaque essai sont donnés dans les annexes A et B.

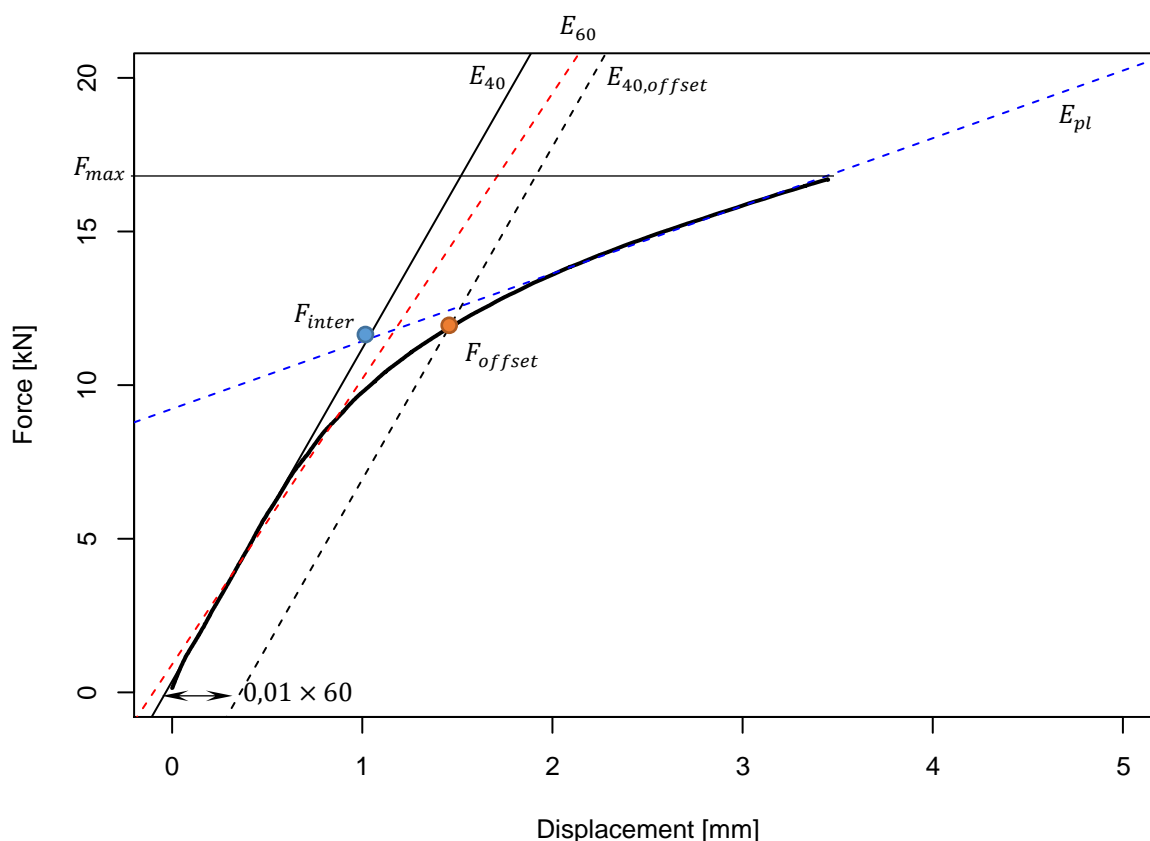


Figure 3-6 : Courbe type Force /déplacement des essais de compression

Différentes méthodes ont été essayées pour qualifier le module d'élasticité dans le cadre de l'étude. En premier lieu, il a été envisagé de définir des bornes inférieure et supérieure dans la phase d'élasticité apparente pour un lot complet d'échantillon de même angle à partir de la valeur moyenne à rupture de l'échantillon complet. Cette méthodologie a le désavantage de ne pas prendre en compte les singularités propres à chaque éprouvette et n'a donc pas été retenue. En second lieu, il a été regardé le principe mathématique dit des courbes LIPSCHITZIENNES qui consiste à rechercher le long de la courbe des zones où la dérivée de la courbe force déplacement est constante. Cette méthode bien que souvent utilisée a le désavantage d'être difficilement automatisable et de dépendre fortement du pas de linéarisation de la courbe d'essais.

En remarquant que les comportements en compression étaient différents en fonction de l'angle entre l'effort et le fil du bois (Cf courbe type pour chaque angle donné dans la Figure 3-7), il a été décidé de retenir des principes différents suivant le type d'essai pour définir une valeur maximale de charge, ainsi :

- pour les essais à 0° et 27° , l'effort F_{max} retenu pour estimer les seuils de dépouillement est l'effort maximal atteint par l'éprouvette du fait qu'il ait été observé un comportement adoucissant pour ces essais
- pour les essais à 56° , 73° et 90° la résistance en compression maximale retenue est l'effort F_{offset} atteint pour un déplacement selon un offset de $0,01 h$ (h étant la hauteur de l'éprouvette). La méthode est itérative, pour initier l'approche et définir une tangente initiale la résistance maximale atteinte par l'échantillon est retenue au départ.

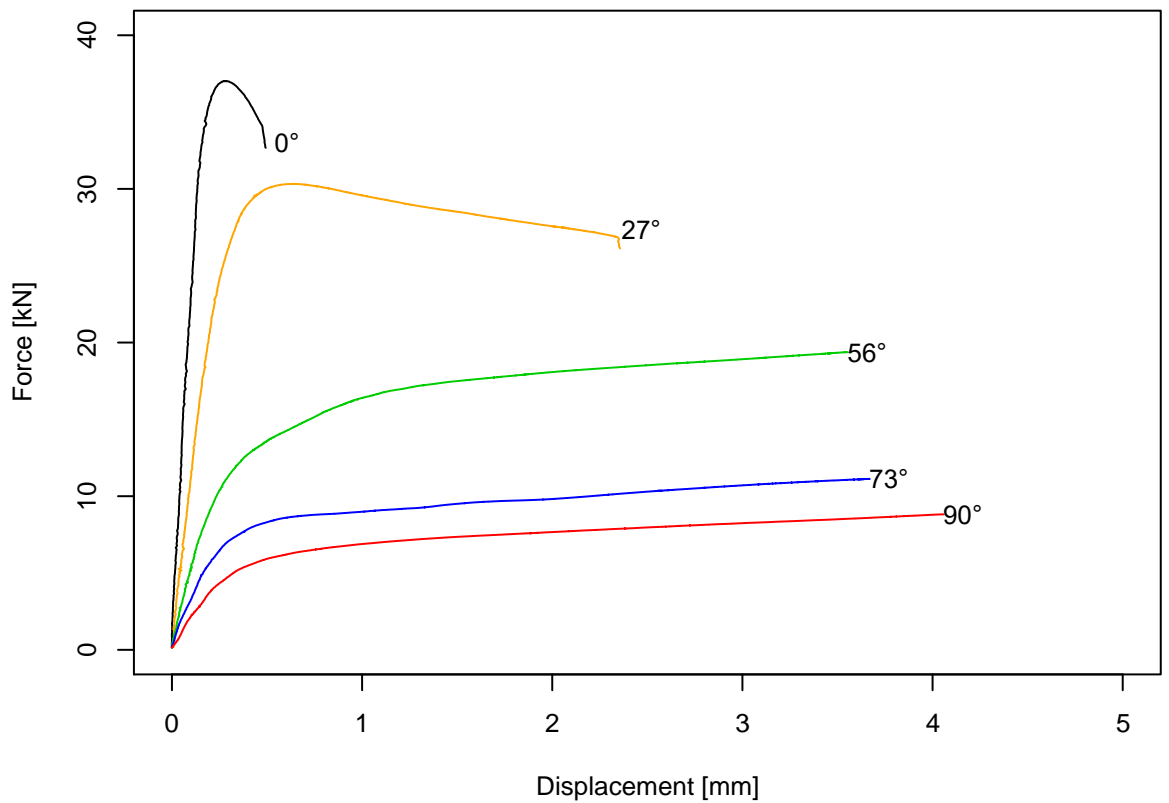


Figure 3-7 : Courbe force déplacement type en fonction des angles pour des éprouvettes de hêtre

3.6.3 Calcul des contraintes de cisaillement

Les contraintes résistantes ont été évaluées dans la zone amincie pour chaque éprouvette en se basant sur la norme EN 408 [9] qui propose l'équation suivante :

$$\sigma_c = \frac{F}{A_i} \quad (3-1)$$

Avec :

F : Force maximale à rupture déterminée selon la méthodologie proposée au paragraphe 4.6.2

A_i : la section transversale de l'éprouvette

3.6.4 Calcul des modules d'élasticité

Les modules d'élasticité ont été déterminés pour chaque mesure du déplacement en se basant sur la norme EN 408 [9] qui propose l'équation suivante :

$$E_c = \frac{\ell_i \times (F_2 - F_1)}{A_i \times (W_2 - W_1)} \quad (3-2)$$

Avec :

ℓ_i : la longueur entre les points de mesure de l'écrasement

A_i : la section transversale de l'éprouvette

$F_2 - F_1$: l'accroissement de force sur la partie linéaire de la courbe force/déplacement compris en 10% et 40% ou 60% de l'effort maximal.

$W_2 - W_1$: l'accroissement des écrasements correspondant à $F_2 - F_1$

Si le calcul est correct le long de la zone critique, il a été nécessaire d'intégrer la géométrie réelle de l'éprouvette pour estimer le module d'élasticité lié au déplacement de la tête du piston et celui lié à la mesure de l'écrasement de l'éprouvette du fait de la section variable. En faisant l'hypothèse que le module était homogène sur la hauteur de l'éprouvette et en simplifiant la géométrie comme il est indiqué sur les Figure 4-8 et Figure 3-9, il vient les équations (3-4) à (4-5) pour le calcul des modules d'élasticité.

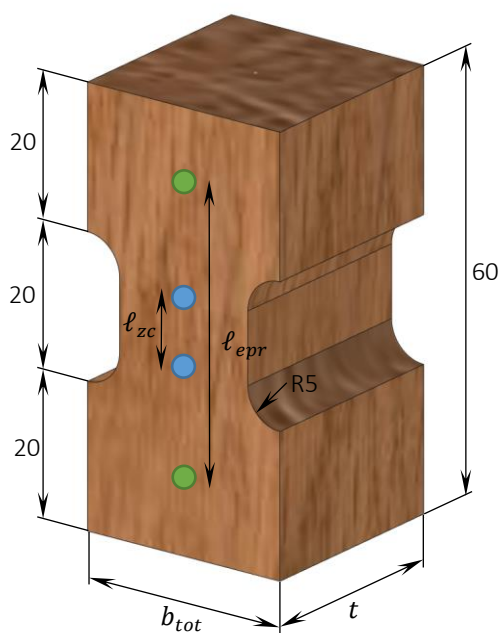


Figure 3-9 : Géométrie réelle des éprouvettes

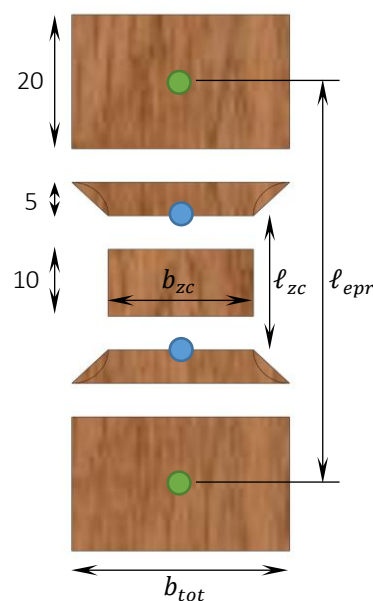


Figure 3-8 : Simplification de la géométrie

$$E = \frac{\Delta F}{\Delta \ell_i} \times \sum \frac{\ell_i}{S_i} \quad (3-3)$$

Soit pour l'éprouvette entière avec la mesure du déplacement du piston :

$$E_{piston} = \frac{\Delta F}{\Delta \ell_{piston}} \times \frac{2}{t} \left(\frac{20}{b_{tot}} + \frac{5}{(b_{tot} + b_{zc})/2} + \frac{5}{b_{zc}} \right) \quad (3-4)$$

Soit pour l'éprouvette entière avec la mesure du déplacement entre les cibles :

$$E_{epr} = \frac{\Delta F}{\Delta \ell_{epr}} \times \frac{1}{t} \left(\frac{\ell_{epr} - 20}{b_{tot}} + \frac{10}{(b_{tot} + b_{zc})/2} + \frac{10}{b_{zc}} \right) \quad (3-5)$$

Soit dans la zone critique avec la mesure du déplacement entre les cibles de la zone critique :

$$E_{zc} = \frac{\Delta F}{\Delta \ell_{zc}} \times \frac{\ell_{zc}}{t \times b_{zc}} \quad (3-6)$$

Avec :

E_{piston} , E_{epr} et E_{zc} les modules d'élasticité mesuré en fonction des déplacements mesurés [MPa].

t : épaisseur de l'éprouvette [mm].

b_{tot} : largeur totale de l'éprouvette [mm].

b_{zc} : largeur de la zone critique [mm].

ℓ_{epr} et ℓ_{zc} : distances réelles mesurées entre les objets [mm].

3.6.5 Correction des résultats en fonction de l'humidité

Conformément à l'EN 384 [6], il convient de corriger la masse volumique pour la ramener à une humidité de référence de 12%. Pour le LVL de hêtre, les masses volumiques ne sont pas corrigées car le produit est de base à une humidité de 6%.

$$\rho = \rho(u) [1 - 0,005 (u - u_{ref})] \quad \text{pour } 8\% < u < 18\% \quad \text{avec } u_{ref} = 12\% \quad (3-7)$$

La norme EN 384 [6] impose de corriger la résistance en compression parallèle au fil en fonction de l'humidité selon l'équation (3-7). Néanmoins, comme il n'existe pas d'étude pour la correction en fonction des autres angles, et comme les humidités sont relativement similaires entre les différents angles, il a été choisi de ne pas corriger les résistances en fonction de l'humidité.

$$F_{c,0} = F_{c,0}(u) [1 + 0,03 (u - u_{ref})] \quad \text{pour } 8\% < u < 18\% \quad \text{avec } u_{ref} = 12\% \quad (3-8)$$

3.7 Analyse statistique des données expérimentales

L'expression des valeurs caractéristiques au fractile de 5% et des valeurs moyennes caractéristiques a été réalisé en suivant les prescriptions données par l'EN384 [6]. Cette norme demande d'utiliser les méthodes de calcul définie dans l'EN 14358 [8], méthodes explicitées dans la suite de ce rapport. Ces valeurs doivent conformément aux prescriptions de l'EN 1990 être exprimée avec un niveau de confiance de 75%

Les masses volumiques moyennes et les modules d'élasticité moyens sont exprimées dans le tableau de synthèse de résultats Table 4-1 comme des moyennes caractéristiques. Les autres valeurs moyennes du tableau restent des moyennes arithmétiques.

En fonction du nombre d'essais et de la distribution des résultats, la norme offre deux possibilités pour le calcul des valeurs caractéristiques au fractile de 5% : La méthode paramétrique et la méthode non paramétrique. La méthode non-paramétrique requérant au minimum 40 échantillons par lots, elle ne peut pas être utilisée dans le cadre de cette étude.

3.7.1 Valeur caractéristique - méthode paramétrique

Dans le cadre de campagnes d'essais comportant moins de 40 échantillons, ou dès lors que la distribution des propriétés mesurées suit un modèle de distribution statistique normale ou log normale, il convient de déterminer les valeurs caractéristiques à partir de modèles paramétrés. La norme indique qu'en général, les mesures de résistances suivent une distribution selon une loi Log-Normale alors que pour les masses volumiques et les modules d'élasticité, la distribution des données est définie comme étant normale. Néanmoins, le choix de l'une des deux distributions sera justifié à partir du résultat d'un test de la normalité des données expérimentales (test de Shapiro).

Dans le cas de la distribution Normale ou Log-normale, il faut déterminer le facteur donnant la limite inférieure de tolérance à p% avec un niveau de confiance de $\alpha\%$: $k_s(n) = \frac{k_\alpha(n)}{\sqrt{n}}$

Avec $k_\alpha(n)$ le fractile d'ordre $\alpha\%$ selon une distribution t non centrée avec n-1 degrés de liberté et un paramètre de non centralité $\lambda = u_{1-p}\sqrt{n}$

Et u_{1-p} le fractile d'ordre (1-p) de la fonction de distribution normale.

Ces paramètres sont définis à partir du logiciel statistique R développé par CRAN.

Par exemple, le coefficient k_s d'une valeur caractéristique à 5% avec un niveau de confiance de 75% pour 10 essais est calculé tel que :

Loi normale $u_{1-5\%} : u_{95\%} = 1,644854$

$$\lambda = 1,644854 \sqrt{10} = 5,201484$$

La loi t excentré de $\lambda : k_{75\%}(10) = 6,652381$

$$k_s(10) = \frac{k_\alpha(10)}{\sqrt{10}} = \frac{6,652381}{\sqrt{10}} = 2,103668$$

Ce qui donne le même résultat que celui tabulé dans tableau 1 de l'EN 14358 [8].

Dans le cas de la distribution Log-normale, la méthode de détermination de la valeur caractéristique est la suivante :

- Détermination de la valeur moyenne : $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum \ln m_i$
- Détermination de l'écart-type : $s_y = \max \left[0,05 ; \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\ln m_i - \bar{y})^2} \right]$
- Calcul de la valeur caractéristique à 5% à partir de l'équation : $m_k = e^{(\bar{y} - k_s(n) s_y)}$

Dans le cas de la distribution normale, la méthode de de détermination de la valeur caractéristique est la suivante :

- Détermination de la valeur moyenne : $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum m_i$
- Détermination de l'écart-type : $s_y = \max \left[0,05 \bar{y} ; \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (m_i - \bar{y})^2} \right]$
- Calcul de la valeur caractéristique à 5% à partir de l'équation : $m_k = \bar{y} - k_s(n) s_y$

3.7.2 Valeur moyenne caractéristique

Détermination de la valeur moyenne : $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum m_i$

Détermination de l'écart-type : $s_y = \max \left[0,05 \bar{y} ; \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (m_i - \bar{y})^2} \right]$

Définition du facteur permettant de trouver la valeur caractéristique moyenne avec un niveau de confiance de 75% :

$$k_s(n) = \frac{t_{\alpha, n-1}}{\sqrt{n}}$$

Avec $t_{\alpha, n-1}$ fractile d'ordre $\alpha\%$ selon une distribution centrée avec n-1 degrés de libertés.

Cette à partir du logiciel statistique R développé par CRAN.

Par exemple pour un niveau de confiance α de 75% et 10 échantillons on trouve :

$$t_{75\%, 10-1} = 0,7027221 \text{ soit } k_s(n) = \frac{0,7027221}{\sqrt{10}} = 0,2222203$$

Soit le même résultat que dans le tableau 2 de l'EN 14358 [8]

La valeur caractéristique moyenne est obtenue par l'équation : $m_{mean} = \bar{y} - k_s(n) s_y$

4 Résultats expérimentaux

4.1 Tableau de synthèse

Les valeurs moyennes et caractéristiques des propriétés mécaniques issues des résultats expérimentaux sont renseignées dans le Table 4-1. Les histogrammes des propriétés mécaniques mesurées en fonction pour chaque essence et chaque angle entre l'effort et le fil du bois différent sont donnés en Annexe D. Ils montrent que pour certaines configurations (le chêne à 73° est notamment le plus marqué), ils existent de fortes disparités entre les résultats reflétant un problème d'échantillonnage des éprouvettes.

Les coefficients de variation de la masse volumique des éprouvettes de bouleau et de hêtre sont plus faibles que ceux habituellement observés dans d'autres campagnes d'essais réalisés au LERMAB [4] & [10]. Pour le bouleau issu de la même provenance, BENISTAND [10] avait trouvé une masse volumique moyenne oscillant entre 600 et 615 kg/m³ pour un coefficient de variation de 5%. Alors que pour le chêne, ils sont inhabituellement très élevés. Ces deux observations reflètent un manque de disparité dans l'échantillonnage avec une variabilité insuffisante dans un cas et surabondante dans l'autre. En comparaison des essais de COLINS et FINK [11], les modules d'élasticité sont au moins 20% plus faible dans cette campagne expérimentale. La résistance parallèle au fil est supérieure de 10% à ce qu'il est possible de trouver dans la bibliographie, alors qu'elle est 10% inférieure pour la compression à 90° dans cette campagne d'essais par rapport aux résultats de COLINS et FINK. L'écart de densité entre ces essais et ceux réalisés par COLINS et FINK (611 kg/m³ pour la compression à 0° et 620 kg/m³ pour la compression à 90°) pourrait expliquer les différences observées. Pour rappel, les résultats des essais de COLINS et FINK [11] sont :

- 0° $E_{mean} = 16\,530$ MPa (COV : 12%) - $\sigma_{mean} = 52,7$ MPa (COV 10%)
- 90° : $E_{mean} = 620$ MPa (COV : 37%) - $\sigma_{mean} = 6,5$ MPa (COV 28%)

Pour le chêne, malgré une masse volumique plus faible d'environ 5% pour les essais de cette campagne par rapport aux essais de BENISTAND [4], les modules d'élasticité sont du même ordre de grandeur (moins de 5% de différence) alors que les résistances en compression axiale et transversale sont plus fortes d'environ 30%. Cet écart est peut-être lié à la différence d'échelle entre les éprouvettes de cette campagne et les éprouvettes de la thèse de BENISTAND [4].

- 0° : $\rho_{mean} = 723$ kg/m² (COV : 6,0%) - $E_{mean} = 11\,286$ MPa (COV : 24,3%) - $\sigma_{mean} = 44,67$ MPa (COV 17,4%)
- 90° : $\rho_{mean} = 712$ kg/m² (COV : 6,1%) - $E_{mean} = 760$ MPa (COV : 57,1%) - $\sigma_{mean} = 8,34$ MPa (COV 21,1%)
-

Pour le hêtre, les résultats expérimentaux des essais à 0° et 90° sont du même ordre de grandeur que ceux observés par BENISTAND [4] sur des bois de même provenance géographique mais réalisés sur des éprouvettes de plus grandes dimensions (45x90x270) :

- 0° : $\rho_{mean} = 723$ kg/m² (COV : 5,8%) - $E_{mean} = 14\,090$ MPa (COV : 22,0%) - $\sigma_{mean} = 55,72$ MPa (COV 13,1%)
- 90° : $\rho_{mean} = 719$ kg/m² (COV : 5,8%) - $E_{mean} = 886$ MPa (COV : 35,3%) - $\sigma_{mean} = 10,08$ MPa (COV 7,43%)

Pour le LVL de hêtre, les masses volumiques moyennes sont du même ordre de grandeur que les 800 kg/m³ donné par le fabricant. Le coefficient de variation assez faible peut facilement s'expliquer avec un produit aussi standardisé et uniformisé que les panneaux LVL. La différence entre la valeur moyenne et la valeur caractéristique de la masse volumique est de 0,91, soit un COV de 5% minimal imposé par l'EN 14358 [8]. Les résistances en compression caractéristique des panneaux du type LVL S à 0° et 90° sont respectivement données par le fabricant à 57,5 MPa et 14 MPa. Soit un écart de 30% par rapport aux essais parallèle au fil et 20% par rapport aux essais perpendiculaires au fil.

Table 4-1 Synthèses des résultats des essais de compressions par essence et par angle.

Species	Angle	nb	H%	ρ_{mean} [kg/m ³]	ρ_k [kg/m ³]	ρ_{COV} [%]	E_{mean} [MPa]	E_k [MPa]	E_{COV} [%]	$\sigma_{c,mean}$ [MPa]	$\sigma_{c,k}$ [MPa]	$\sigma_{c,COV}$ [%]
Birch	0	32	10,50	665,6	621,7	3,77	13804	6225	30,41	57,48	46,02	11,15
	27	30	10,34	617,5	558,1	5,47	3317	2018	21,85	36,72	31,94	7,84
	56	30	10,86	615,3	563,9	4,76	820	358	31,05	10,34	7,54	17,58
	73	32	10,33	577,2	565,6	1,15	492	350	16,27	6,73	6,06	5,97
	90	32	10,40	560,1	552,5	0,78	402	347	7,88	5,91	5,53	3,96
Oak	0	28	10,68	687,1	460,1	18,44	11169	3198	38,77	57,63	33,57	26,68
	27	28	9,47	749,2	501,2	18,48	4910	1675	35,92	45,61	28,26	24,26
	56	20	11,59	677,8	470,2	16,78	1131	630	24,00	16,24	10,95	21,73
	73	25	11,86	717,9	523,6	15,08	982	761	12,60	13,07	9,31	19,08
	90	28	10,55	670,4	466,6	17,00	805	480	22,44	10,69	8,67	11,13
Beech	0	29	11,14	713,5	665,5	3,83	12813	5634	30,83	64,36	55,94	7,73
	27	32	11,08	701,0	655,1	3,75	4104	1622	33,36	41,47	30,39	16,60
	56	32	10,12	718,6	689,1	2,35	1700	501	38,66	19,21	12,01	24,19
	73	31	10,78	742,0	708,3	2,60	1674	1107	19,00	16,18	11,42	20,26
	90	32	11,04	739,9	697,5	3,28	879	608	17,35	10,96	10,12	4,84
LVL	0	26	6,82	752,1	735,2	1,28	13240	9381	16,25	81,51	75,11	4,60
	27	29	6,15	766,3	736,1	2,25	3323	1840	24,75	44,91	30,48	20,03
	56	29	4,31	762,2	740,6	1,62	851	691	10,58	24,55	21,91	6,29
	73	32	8,93	787,8	759,9	2,03	534	357	18,58	18,68	16,00	7,92
	90	30	5,63	767,3	746,8	1,53	497	430	7,71	18,77	17,07	5,29

4.2 Relation entre E_{40} et E_{60}

Comme le montre la Figure 4-1, hormis pour le LVL de hêtre pour 0 et 27°, il existe une relation forte entre le module d'élasticité définis entre 10 et 40% de F_{max} et le module d'élasticité mesuré entre 10 et 60% de F_{max} en imposant une droite de régression est du type $y = a \times x$. Plus l'angle entre l'effort et le fil du bois augmente et plus le coefficient de corrélation diminue tout comme le coefficient directeur entre le module à 40% et le module à 60% sans pour autant descendre en dessous de 0,83. Le choix de considérer un module d'élasticité sur le tronçon compris entre 10% et 40% de l'effort maximal plutôt que sur une plage plus importante est ainsi justifié.

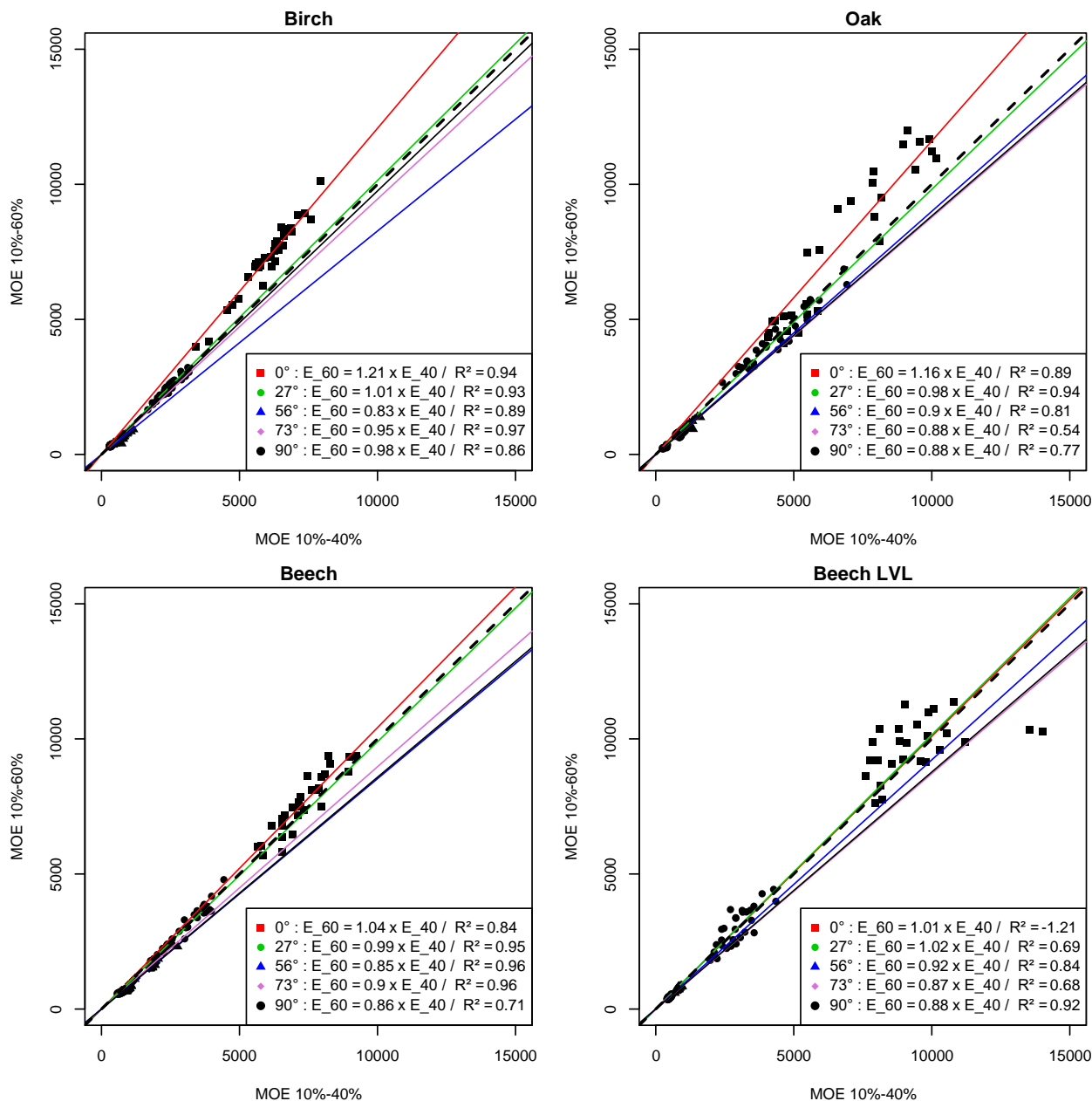


Figure 4-1 : Relation entre le module mesurée entre 10 et 40% de F_{max} et le module mesuré entre 10 et 60% de F_{max} .

4.3 Relation entre le module d'élasticité et la masse volumique

Il n'existe que rarement une relation forte entre la masse volumique et le module d'élasticité, cela est imagé par les courbes de la Figure 4-2. Les relations les plus fortes sont observées pour le chêne et le hêtre pour un angle de 73° entre l'effort et le fil du bois. Néanmoins, pour ces essais, il est possible d'observer des lots distincts d'éprouvettes avec des comportements mécaniques sensiblement différents. L'échantillonnage peut donc à lui seul expliquer la relation qu'il existe entre le module d'élasticité et la masse volumique sur ces essais.

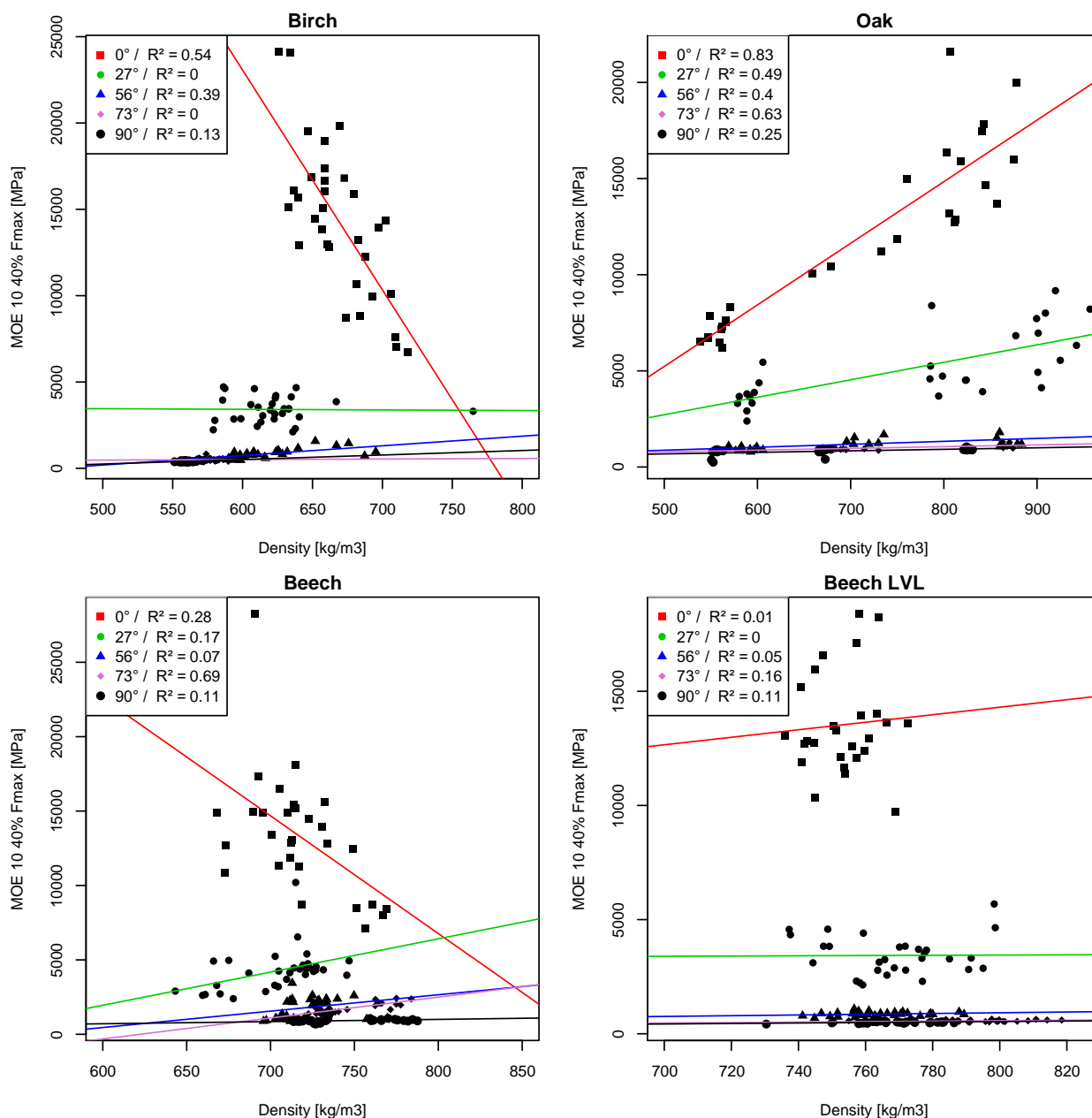


Figure 4-2 : Relation entre le module mesurée entre 10 et 40% de F_{max} et la masse volumique corrigée à 12%.

4.4 Relation entre la résistance et la masse volumique

Comme le montre la Figure 4-3, il n'existe que rarement une relation forte entre la masse volumique et la résistance. Dans ses travaux, BENISTAND [4] avait montré qu'au mieux la relation entre la compression transversale et la masse volumique avait un coefficient de corrélation égale à 0,3 pour le hêtre et le chêne, ce qui est le cas dans cette campagne d'essais pour le chêne mas pas le hêtre. Les relations les plus fortes sont observées sur le chêne où il est possible d'observer deux lots d'éprouvettes avec des propriétés mécaniques significativement différentes.

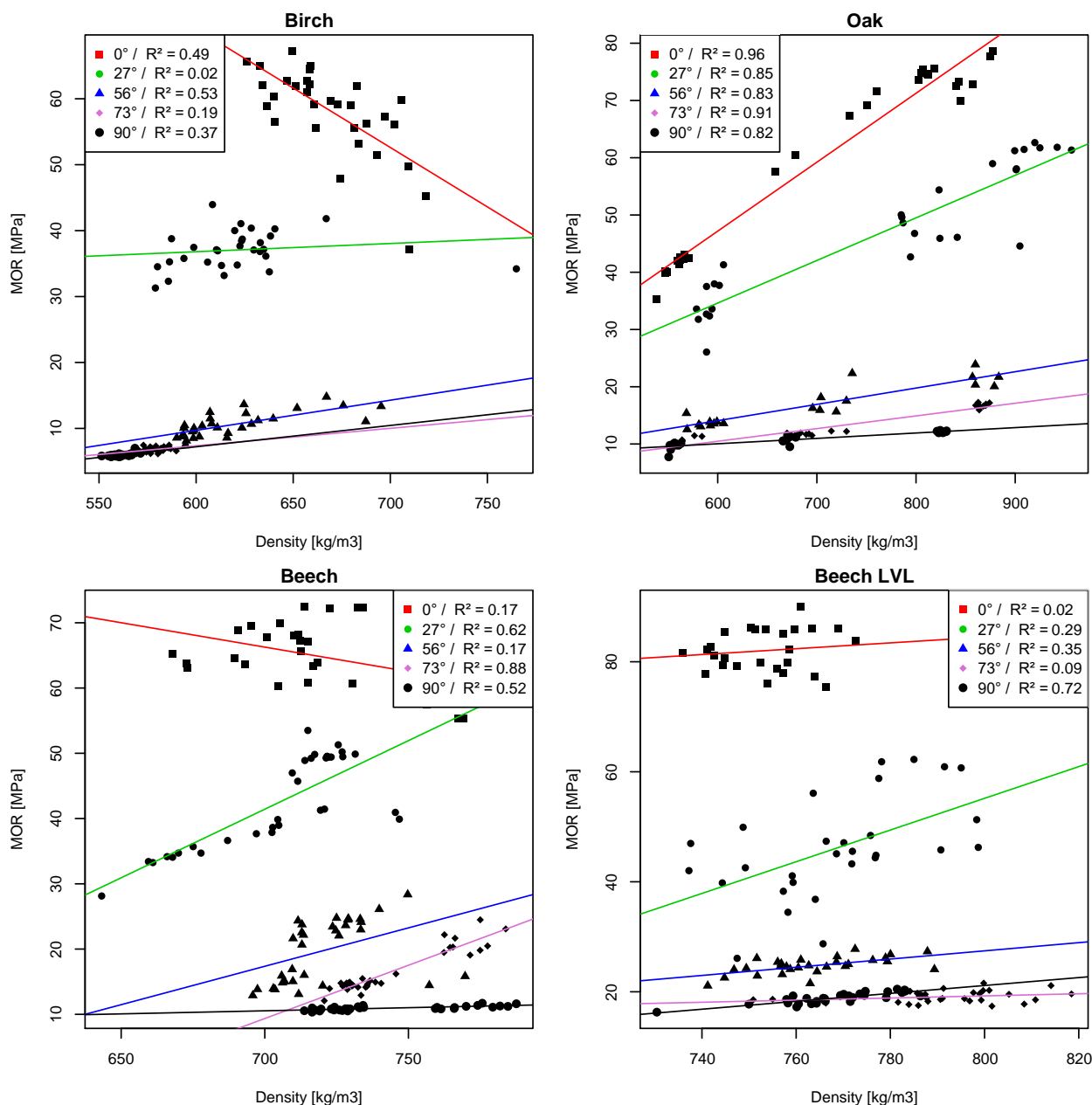


Figure 4-3 : Relation entre la résistance et la masse volumique corrigée à 12% pour chaque essence et chaque angle.

4.5 Relation entre le module d'élasticité et la résistance

La Figure 4-5 montre que plus le module d'élasticité est important et plus la résistance l'est également. Néanmoins, pour chaque configuration d'angles, les relations linéaires entre module et résistance ont des coefficients de corrélations sensiblement différents. Au vu des allures des nuages de points, il est fait le choix d'estimer une relation du type puissance entre la résistance et le module d'élasticité imagé par la courbe en trait tillé. Néanmoins, le fort nombre de points situé dans la première partie de la courbe vient artificiellement augmenter le coefficient de corrélation R^2 de la loi puissance ainsi définie pour chaque essence.

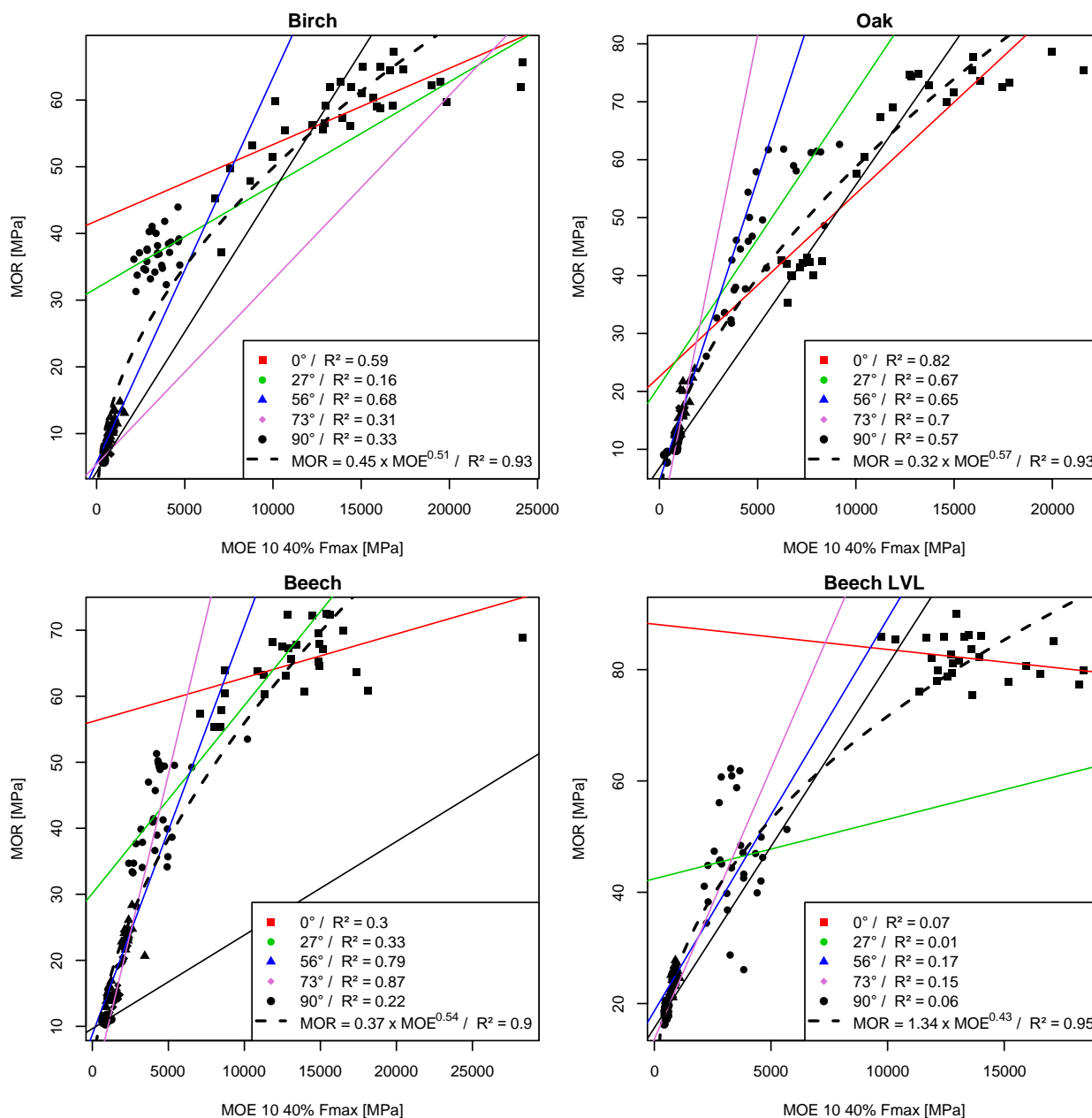


Figure 4-4 : Relation entre le module d'élasticité et la résistance en compression pour chaque essence et chaque angle.

4.6 Relation entre le module d'élasticité et l'angle entre effort et le fil du bois

Les courbes de la Figure 4-5 représentent la variation du module d'élasticité en fonction de l'angle entre l'effort et le fil du bois. Pour chaque essence, il est tracé en bleu les points moyens du module d'élasticité pour chaque angle ainsi que

la courbe bleue correspondant à la courbe de HANKINSON tracée selon l'équation (4-1) en utilisant comme donnée d'entrée les valeurs moyennes trouvées expérimentalement pour 0° et 90°. La courbe en trait tillé noir correspond à la courbe de HANKINSON tracée en utilisant pour le module d'élasticité à 0° et 90° les données bibliographiques de COLINS et FINK pour le bouleau, de BENISTAND pour le hêtre et le chêne et de POLLMEIER pour le LVL de hêtre.

$$F_{c,\alpha,k} = \frac{f_{c,0,k}}{\frac{f_{c,0,k}}{f_{c,90,k}} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (4-1)$$

Hormis pour le module d'élasticité des essais ayant un angle de 27° entre l'effort et le fil du bois (différence de 60%), l'équation de HANKINSON permet une bonne estimation du module pour les autres angles d'essais (différence maximale de 20%).

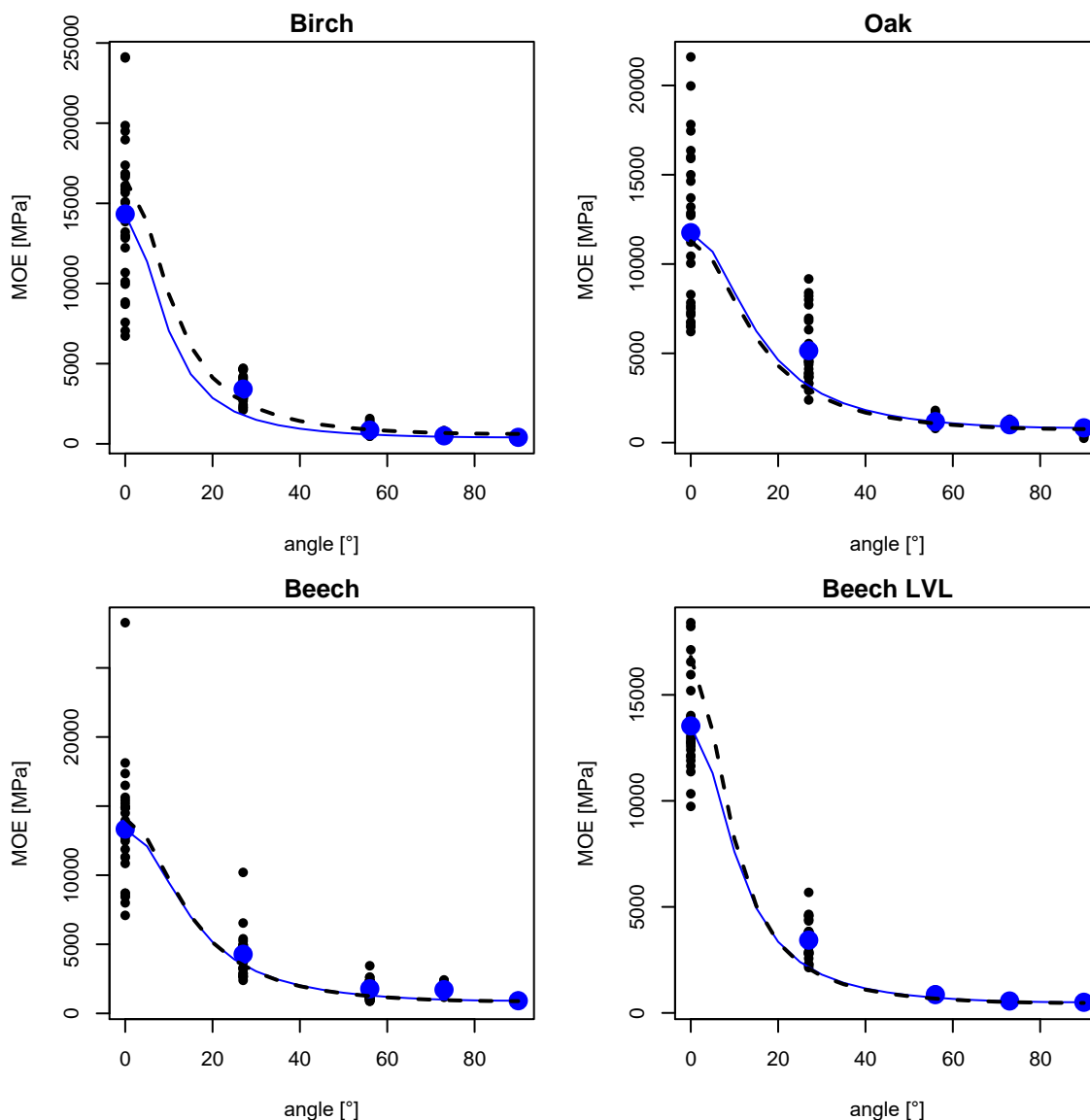


Figure 4-5 : Relation entre le module d'élasticité et l'angle entre l'effort et le fil du bois pour chaque essence.

Pour le LVL de hêtre la différence de module pour les essais parallèles au fil est liée à la valeur de 16 800 MPa qui est le module d'élasticité en flexion et non pas celui mesuré en compression (la donnée n'ayant pas été trouvée lors de l'étude bibliographique).

4.7 Relation entre la résistance et l'angle entre effort et le fil du bois

Les variations de la résistance en fonction de l'angle entre l'effort et le fil du bois sont données dans la Figure 4-6. Pour chaque essence, il est tracé en bleu les points moyens de résistance pour chaque angle et en rouge les valeurs caractéristiques. Les courbes tracées en bleu et en rouge correspondent aux courbes de HANKINSON tracée selon l'équation (4-1) en utilisant comme donnée d'entrée les valeurs moyennes et caractéristiques trouvées expérimentalement. Les courbes en trait tillé correspondent aux courbes de HANKINSON tracées en utilisant pour les résistances à 0° et 90° les données bibliographiques de COLINS et FINK pour le bouleau, de BENISTAND pour le hêtre et le chêne et de POLLMEIER.

Il est intéressant de noter que hormis pour le hêtre, la prédiction des résistances moyenne et caractéristique fonctionne convenablement pour estimer la résistance entre 56 et 90° (40% de différence au maximum, mais 6% de différence moyenne au global). Pour la prédiction de la résistance pour un angle de 27° entre l'effort et le fil du bois, la formule de HANKINSON fonctionne bien pour les valeurs caractéristiques du hêtre et pour les valeurs moyennes du LVL de hêtre. Pour les autres, les écarts sont relativement importants avec une différence pouvant aller jusqu'à 80%. Néanmoins, cette absence de relation entre les différentes résistances en compression et l'angle pourrait simplement être liée à un défaut d'échantillonnage avec des propriétés inhomogènes entre les différents lots d'éprouvette sélectionnées pour chaque angle.

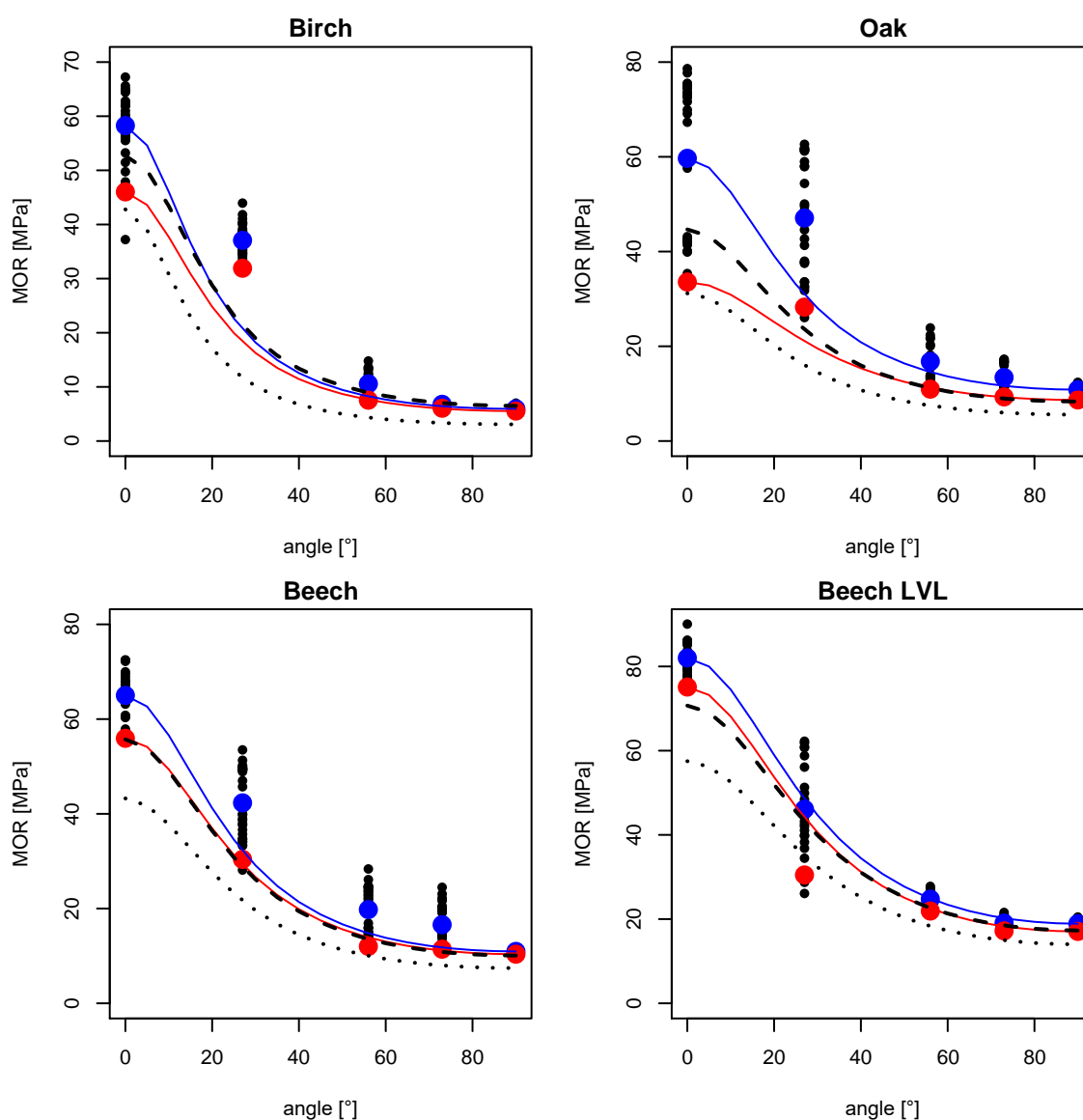


Figure 4-6 : Relation entre la résistance et l'angle entre l'effort et le fil du bois pour chaque essence.

Compte tenu des différences observées entre la prédiction de la résistance et les valeurs expérimentales pour un angle de 27° entre l'effort et le fil du bois, il a été décidé d'étudier une variation de la formule de HANKINSON en modifiant la puissance des termes trigonométriques comme il est présenté dans l'équation (4-2). Au moyen d'une minimisation du résidu réaliser sur le logiciel R, les coefficients a ont été déterminés pour chaque essences et représentés sur la Figure 4-7. Il apparait qu'il existe une forte différence selon l'essence étudiée et que la différence entre le coefficient lié aux valeurs moyennes et le coefficient lié aux valeurs caractéristiques varie entre 0 et 43%.

$$F_{c,\alpha,k} = \frac{f_{c,0,k}}{\frac{f_{c,0,k}}{f_{c,90,k}} \sin^a \alpha + \cos^a \alpha} \quad (4-2)$$

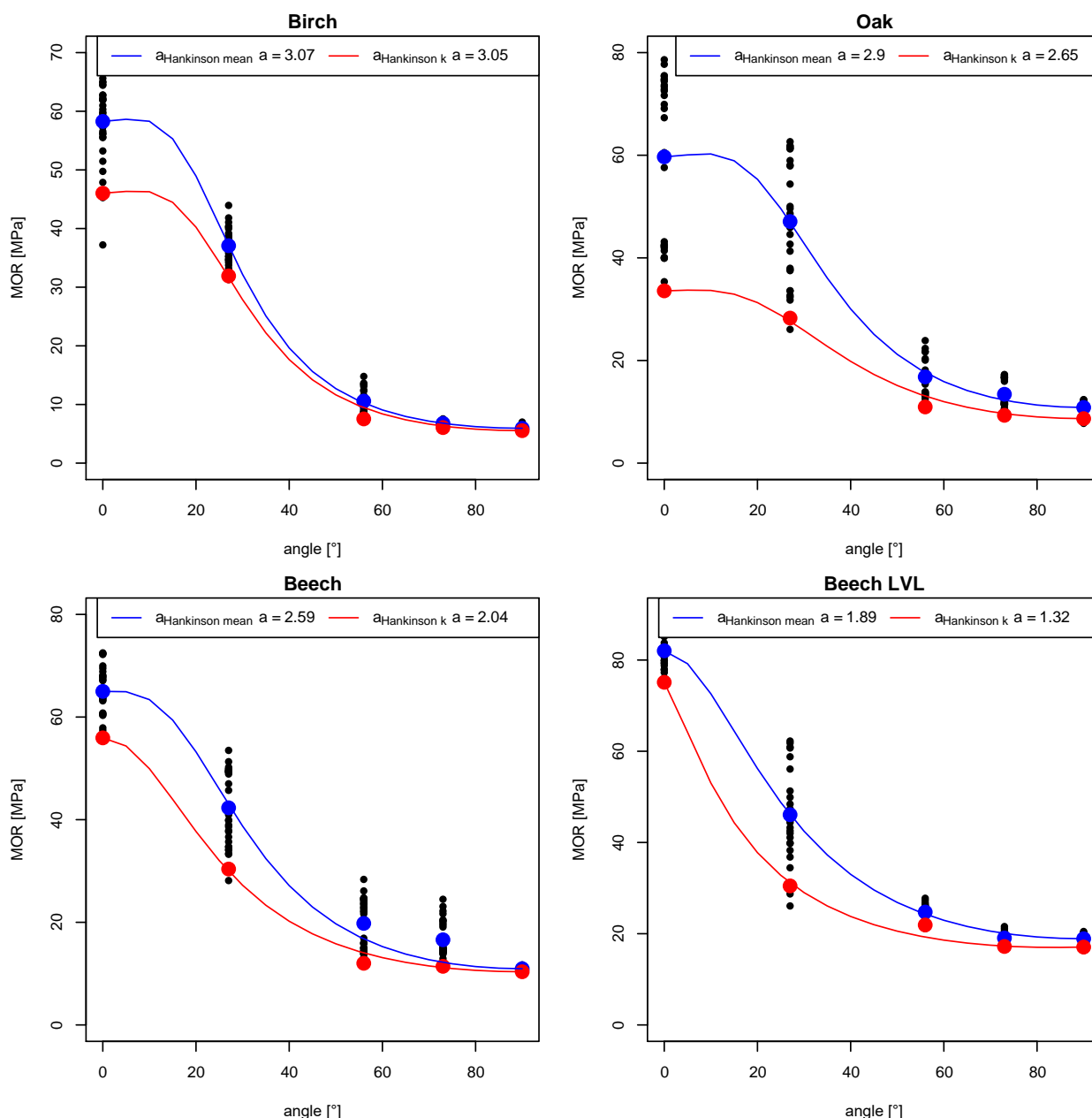


Figure 4-7 : Relation de HANKINSON Modifiée entre la résistance et l'angle entre l'effort et le fil du bois pour chaque essence.

La variation de résistance en fonction de l'angle de l'effort et le fil du bois peut également être expliqué par le critère de NORRIS (Equation (4-3)). Cette équation introduit ainsi la résistance en cisaillement $f_{v,k}$ qui n'est pas connue pour des éprouvettes de cette échelle. Une analyse inverse a donc été conduite en utilisant les résistances mesurées à 0 et 90° pour estimer la contrainte de cisaillement f_v propre à chaque essence. Néanmoins, pour le chêne et le bouleau, cette analyse conduit systématiquement à des valeurs aberrantes de résistance en cisaillement. Cela est principalement lié aux fortes résistances mesurées pour les éprouvettes ayant un angle de 27°. En conséquent, ces deux essences n'ont pas été traitées en analyse inverse.

Les résistances en cisaillement déterminées par analyse inverse et présentées sur la Figure 4-8 montre des valeurs moyennes sensiblement différentes à celles connues en bibliographie ($f_{v,mean} = 12,38 \text{ MPa}$ pour le hêtre dans la thèse de BENISTAND [4]) alors que les valeurs caractéristiques n'ont que 20% de différences avec celles de références ($f_{v,k} = 10,19 \text{ MPa}$ pour le Hêtre [4] et $f_{v,k} = 7,8 \text{ MPa}$ pour le LVL de hêtre selon le fabricant POLLMEIER).

$$f_{c,\alpha,k} = \frac{f_{c,0,k}}{\sqrt{\left(\frac{f_{c,0,k}}{f_{c,90,k}} \sin^2 \alpha\right)^2 + \left(\frac{f_{c,0,k}}{1,5 \times f_{v,k}} \sin \alpha \cdot \cos \alpha\right)^2 + \cos^4 \alpha}} \quad (4-3)$$

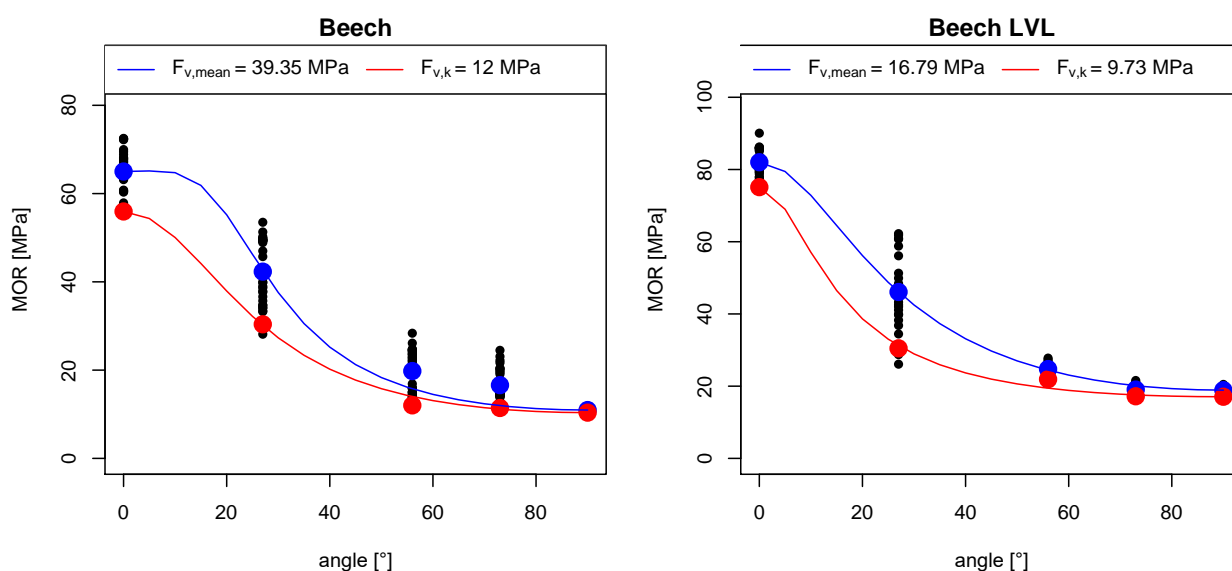


Figure 4-8 : Estimation de la résistance en cisaillement à partir du critère de NORRIS pour le hêtre et LVL de hêtre.

4.8 Impact de l'orientation des cernes sur la résistance

Comme le montre la Figure 4-9, sur le chêne, pour les essais à 90°, l'orientation des cernes semble avoir une incidence sur le comportement des éprouvettes. L'orientation des cernes en quartier donne un comportement moins lisse dans la zone de plastification du fait de micro-rupture qui apparaissent tangentiellement aux cernes d'accroissement. Ces observations avaient déjà été décrites sur le chêne et le hêtre dans la thèse de BENISTAND.

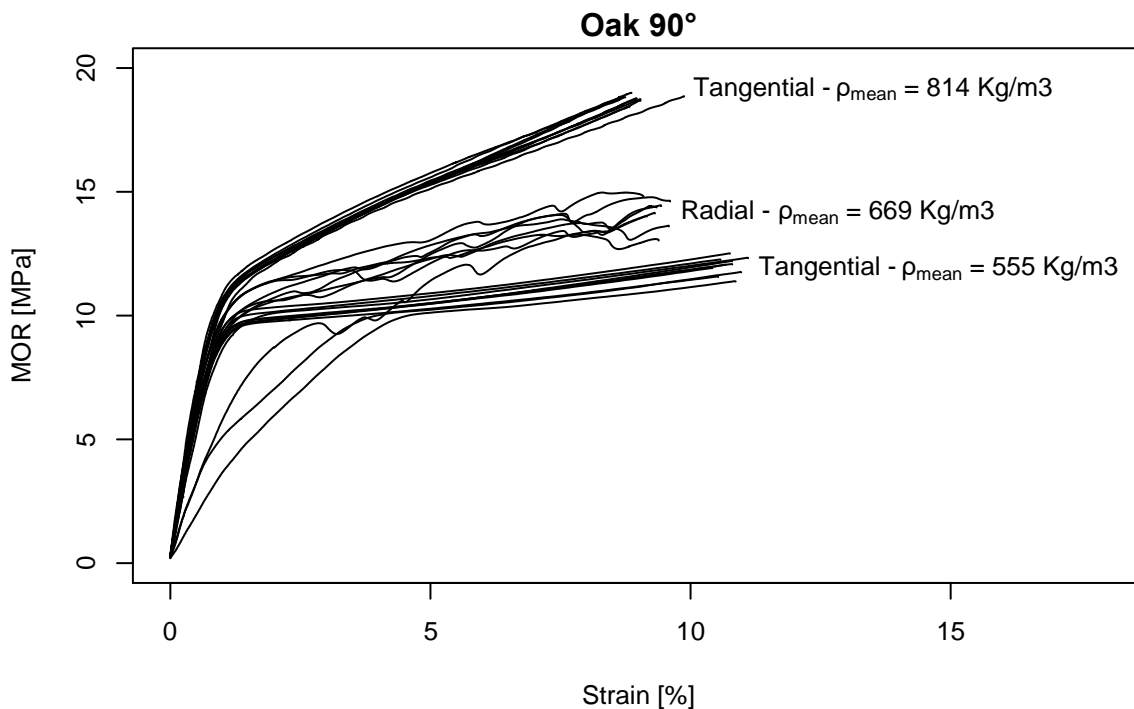


Figure 4-9 : Incidence de l'orientation des cernes sur les courbe contrainte déformation pour le chêne à 90°

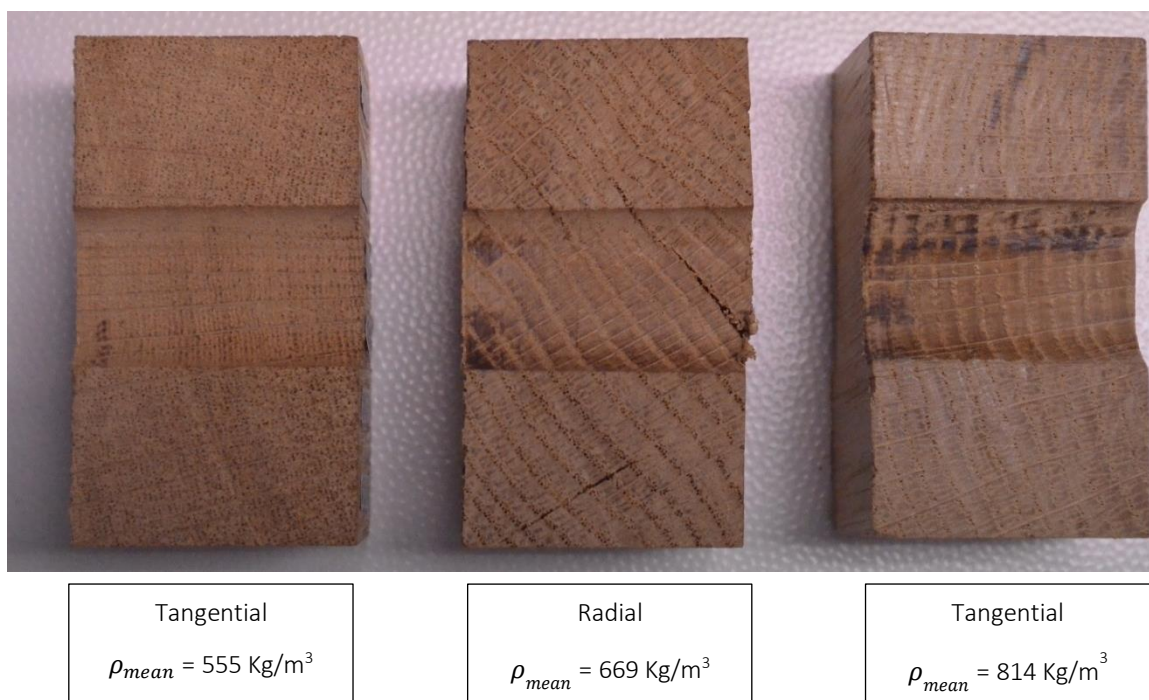


Figure 4-10 : Orientation des cernes des lots de la Figure 4-9.

4.9 Loi RICHARD ABBOTT

Pour modéliser le comportement du bois dans le modèle aux éléments finis, l'utilisation d'une loi mathématique RICHARD ABBOTT donnée par l'équation (4-4) a été utilisée pour chaque essai. Les paramètres d'une loi moyenne ont ainsi été déterminés. Cette équation a ensuite été tracée en rouge sur l'ensemble du faisceau de courbes de chaque série d'essence et d'angles comme il est présenté en exemple sur la Figure 4-11. Les paramètres moyens des lois de comportements sont donnés dans le Table 4-2 ainsi qu'en légende de chacune de ces courbes présente en Annexe E.

$$y(u) = \frac{(E_0 - E_{pl}) \cdot u}{\left[1 + \left[\frac{(E_0 - E_{pl}) \cdot u}{F_{inter}} \right]^{a_1} \right]^{\frac{1}{a_1}}} + E_{pl} \cdot u \quad (4-4)$$

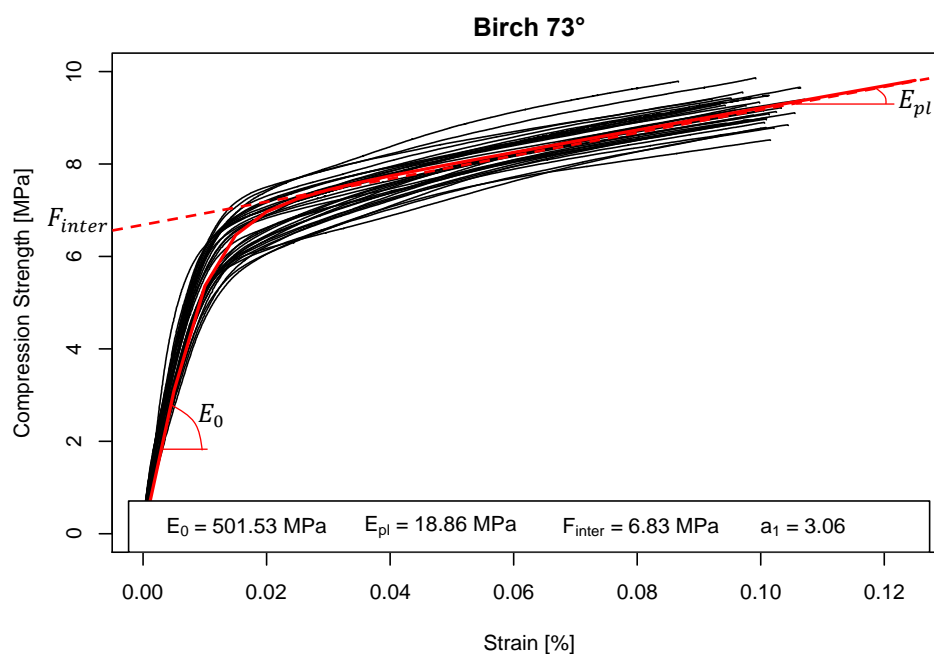


Figure 4-11 : Loi RICHARD ABBOTT pour le bouleau avec un angle de 73° entre l'effort et le fil.

Table 4-2 Synthèses des courbes de comportement par essence et par angle.

Species	Angle	E_0	E_{pl}	F_{inter}	a_1
Birch	56	852,38	41,85	10,08	3,47
	73	501,53	18,86	6,83	3,06
	90	405,80	17,84	5,54	5,96
Oak	56	1174,39	25,43	18,67	2,28
	73	995,13	44,97	12,96	4,16
	90	816,06	37,21	10,29	5,29
Beech	56	1785,85	43,19	21,13	2,37
	73	1709,62	44,57	16,62	3,08
	90	915,53	30,42	10,94	2,83
LVL	56	862,74	49,68	24,67	4,86
	73	563,12	103,78	15,68	3,64
	90	508,60	102,35	15,36	3,54

5 Conclusions

Cette partie de l'étude a consisté à réaliser des essais de compression sur des éprouvettes parallélépipédiques jusqu'à atteindre la rupture sur trois essences de bois et un produit reconstitué : bouleau, chêne, hêtre et LVL de hêtre. Ces éprouvettes ont été usinées pour que le sens du fil varie et ne reste pas parallèle à la direction de compression. Ainsi en faisant varier l'angle de 0, 27, 56, 73 et 90 la résistance et le module d'élasticité mesurés ont pu varier ce qui a fait intervenir indirectement la résistance au cisaillement du bois et son interaction avec la compression transversale, ceci était le but recherché.

Les résistances qui ont été trouvées sont en général, supérieures aux valeurs de la bibliographie ce qui peut s'expliquer par la taille des éprouvettes. En effet, la taille du volume contraint étant petit, le niveau de défaut baisse et la résistance augmente. En revanche, les modules d'élasticité sont du même ordre de grandeur que ceux trouvés dans la bibliographie. Mesurer un module d'élasticité sur une éprouvette de bois de petites dimensions est en général très délicat. Le fait de retrouver des modules proches de la bibliographie prouve que le protocole d'essais a été bien maîtrisé et que les résultats obtenus sont fiables. Il est cependant à regretter le manque de variabilité naturelle dans certains lots d'éprouvettes. En effet, les éprouvettes auraient dû être mieux réparties au taillage dans les planches triées à cet effet, mais la consigne a été oubliée au moment de la mise en oeuvre. Il faudra donc remarquer que les faisceaux de courbes ne sont pas toujours uniformément répartis ce qui n'affecte pas l'allure des courbes et donc les paramètres pour modéliser l'évolution moyenne des contraintes. Pour la modélisation des assemblages complets, les valeurs moyennes seront utilisées pour représenter les comportements, les résultats obtenus restent donc tout à fait valables et utilisables.

La détermination du module d'élasticité par régression linéaire entre 10 et 40 % de la contrainte à rupture des évolutions mesurées s'est avérée très concluante. Cette méthodologie a donc été préférée à une méthodologie plus mathématique appelée méthode Lipschitzienne. L'échec de cette approche réside principalement dans le fait que les éprouvettes étaient testées sans confinement et que pour certains angles de sollicitation, l'évolution force déplacement ne s'est pas montrée aussi continue qu'il était attendu.

La résistance obtenue par les essais avec une pente de fil de 27° par rapport à la direction de compression s'est avérée souvent supérieure à la valeur lissée des modèles. Pour cet angle, il est apparu que la zone qui avait été amincie pour favoriser l'apparition de la rupture n'était pas assez grande, une rupture par cisaillement aurait dû apparaître mais elle a été perturbée par une interaction de compression. Si la méthodologie proposée devait être mis en œuvre à nouveau, il serait pertinent d'augmenter la hauteur de la zone amincie comme le montre la photo ci-dessous d'une éprouvette rompue.



L'analyse croisée module et résistance n'indique pas de tendance propre, un effet essence et donc anatomique est présent. Les paramètres des lois de modélisation des évolutions contrainte-déformation ont donc été déterminés pour chacune des essences testées à chacun des angles.

Après plusieurs essais de modélisation mathématique, il est apparu malgré son caractère plus mathématique que physique que la loi de Hankinson est la fonction qui permet de décrire le mieux l'évolution de la résistance et du module d'élasticité des bois feuillu testés en fonction de l'angle.

Le travail préliminaire au calage du modèle hybride a été correctement conduit et apporte une confirmation propre sur les lois d'interpolation à utiliser et à mettre en œuvre pour les bois feuillus, même qu'il soit encore pour le moment peu utilisé dans la construction. Le travail d'identification des paramètres de la mousse (foam) n'a pas été conduit faute de temps bien que les modèles éléments finis paramétriques des éprouvettes de compression et des embrèvements aient été réalisés.

Avant d'enclencher une campagne d'essais de compression sur des embrèvements multi-pas en bois feuillu afin de disposer d'une base de données fiables, il a été réalisé une précampagne d'essais sur des bois résineux. En effet, le volume de bois à disposition ne pouvant pas permettre des essais exploratoires ou de mise au point, du bois résineux a été utilisé en phase préliminaire. Ces essais ont confirmé les modes de ruptures envisagés et ont montré que dans le cas de rupture fragile (angle faible entre les éléments d'un embrèvement) les seuils de rupture étaient bien supérieurs aux seuils estimés à l'aide de la bibliographie. Les estimations des ruptures ductiles ont-elles été beaucoup mieux approchés. Il a donc été préféré à ce stade de l'étude de mettre au point une modélisation de rupture fragile des assemblages plutôt que de terminer l'identification et la mise au point de la modélisation ductile des assemblages.

A travers la bibliographie, c'est la longueur cisailée du talon de l'embrèvement qui est la plus complexe à évaluer. Pour déterminer cette longueur en fonction des paramètres de l'embrèvement, il est nécessaire de pouvoir prédire la rupture fragile de l'assemblage. De manière simplifiée, le comportement en cisaillement du bois est généralement considéré comme fragile. L'observation des phénomènes réels montre qu'un comportement élastique parfaitement fragile n'est pas physique, le comportement en cisaillement revêt plutôt un caractère adoucissant. Une formulation éléments finis de modélisation d'interface appelée « Joint » a donc été identifiée et mise au point pour être incorporé à une modélisation paramétrique des embrèvements multi-pas. Cette modélisation permet de déterminer, après le calcul non linéaire de la résistance de l'assemblage, la longueur cisailée ou ce qui est souvent appelé longueur effective. Dans cette modélisation a aussi été implémentée la détermination des excentricités d'assemblage, distances qui sont nécessaires lorsqu'il est souhaité pour un calcul structural précis, d'idéaliser les éléments par des éléments finis de type poutres. Toute cette démarche est décrite dans le document **« Modélisation du comportement fragile des embrèvements à pas multiple »** [1]. Bien que la modélisation soit mise au point, mais simplement par faute de moyen et de temps, la campagne d'essais sur le feuillu et l'exploitation des résultats du modèle n'ont pu être réalisés. L'ensemble de la démarche devra donc être réactivé le moment venu, pour fournir les résultats à l'industrie quand elle en exprimera le besoin.

6 Références

- [1] I. TAVAKOLI, *Modélisation tridimensionnelle d'assemblages de structure bois en tôle pliée mince par la méthode des éléments finis (These)*, Université de Lorraine, 2011.
- [2] M. VERBIST, J. BRANCO, E. POLETTI, T. DESCAMPS et P. LOURENCO, *Single Step Joint: overview of European standardized approaches and experimentations*, Materials and Structures, 2016.
- [3] D. GUITARD, *Mécanique du matériau bois et composites*, Cepadues edition, 1987.
- [4] T. BENISTAND, *Caractérisation mécanique des bois feuillus Français en vue de leur meilleure intégration aux Eurocodes 5 (Theses)*, Université de Lorraine, 2019.
- [5] ISO/TC125, *ISO 554 : Standard atmospheres for conditioning and/or testing -- Specifications*, 1976.
- [6] CEN, *EN 384 : Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density*, 2018.
- [7] CEN, *EN 13183-1 : Moisture content of a piece of sawn timber - Part 1 : Determination by oven dry method*, 2002.
- [8] CEN, *EN 14358 : Timber structures - Calculation and verification of characteristic values*, 2016.
- [9] CEN, *EN 408 : Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties*, 2013.
- [10] T. BENISTAND, L. BLERON et J.-F. BOCQUET, *INTER 53-7-3 : Embedding Strength Prediction for European Hardwood Species*, 2020.
- [11] S. COLLINS et G. FINK, *Mechanical behaviour of sawn timber of silver birch under compression loading*, Wood Material Science & Engineering, 2020.

- [12] BOCQUET, *Modélisation des déformations locaux du bois dans les assemblages broches et boulonnes (These)*, 1997 Université Blaise Pascal – Clermont II. Ecole doctorale sciences pour l'ingénieur de Clermont Ferrand.

Annexe A Rappel sur la modélisation hybride du bois Thèse TAVAKOLI [1]

PARTIE 4 - MODELISATION DU MATERIAU BOIS

1. LE BOIS, UN MATERIAU AU COMPORTEMENT COMPLEXE

L'utilisation du bois dans de nombreux domaines tels que la construction ou l'ameublement, pour ne citer que les plus connus, nécessite des outils de modélisation toujours plus pointus pour prévoir le comportement des objets. Bien que le bois mis en œuvre subisse, à des degrés divers en fonction de sa destination finale, des transformations mécaniques industrialisées, il conserve malgré tout des caractéristiques mécaniques fortement liés à son origine naturelle.

De façon très schématique, le bois est constitué d'un ensemble de cellules allongées vides arrangées par juxtaposition et empilement. Ces arrangements subissent des variations non pas géométriques mais plutôt dimensionnelles fortement liées à l'alternance des périodes de croissance de l'arbre dont il est issu. Il peut alors être dit que le matériau est déjà une structure sophistiquée par lui-même présentant une porosité importante. Suivant l'échelle à laquelle il est observé, la description mécanique du bois peut alors varier. En général, il est retenu qu'à une échelle de l'ordre du cm^3 , il possède trois directions privilégiées qui sont nommées L, R et T. La direction L est parallèle à la direction allongée des cellules (parallèle à l'axe du tronc). La direction R est orthogonale à la direction L, cette direction appelée radiale est également parallèle à un axe dirigé du centre du tronc de l'arbre vers l'extérieur. Enfin la direction tangentielle est orthogonale aux deux directions précédentes. Elle porte ce nom car cette direction est en fait tangente aux cernes de croissance (voir figure 76).

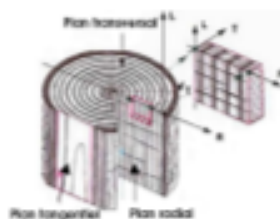


Figure 76 : Directions principales d'orthotropie du bois ainsi que leur plan associé.

Suivant chacune de ces directions, le bois montre des propriétés mécaniques très différentes. Suivant les sollicitations et leurs sens, le comportement peut être très ductile ou très fragile.

Lorsque le bois est sollicité par une contrainte normale dans le sens du fil en compression, il montre tout d'abord un comportement élastique jusqu'à atteindre une limite. Cette limite traduit la capacité maximale de l'arrangement cellulaire à supporter la pression. En condition d'essais, où la matière est confinée, la phase suivante est une phase d'effondrement cellulaire qui se traduit par une densification de la matière : le comportement est ductile. Lorsque la contrainte normale est une

- PARTIE 4 - MODELISATION DU MATERIAU BOIS

traction, le comportement est également élastique dans une première phase, mais il se révèle en revanche fragile. Le comportement élastique est généralement reconnu comme étant le même quel que soit le sens de sollicitation. Les limites de résistance sont cependant différentes suivant qu'il s'agisse de bois parfait (sans défaut) ou non, et suivant le niveau de confiance qui est attribué à la valeur caractéristique retenue pour établir la comparaison.

Le comportement dans les directions R et T présente des similitudes mécaniques très fortes. Leur différenciation n'est nécessaire, en général, que pour des applications spécifiques éloignées du domaine de la modélisation en construction bois. Lorsque le bois est sollicité perpendiculairement à la direction L par des contraintes normales, il montre un comportement élastique avant l'atteinte d'une limite. Le module d'élasticité qui régit cette phase est bien plus faible que celui qui caractérise le sens longitudinal (entre le 1/20 et le 1/30 pour un bois résineux). La limite élastique est également beaucoup plus faible que la limite élastique dans le sens L (1/10). L'atteinte de ce seuil de résistance se manifeste par un écrasement des couches de cellules les plus faibles. Cet effondrement de la structure intime du bois se poursuit par une phase de densification de la matière ligneuse. Toujours dans la même direction de sollicitation, sous contrainte normale de traction, le bois se montre particulièrement fragile avec une valeur seuil très faible. Cette rupture se traduit par la décohérence et le déchirement des cellules. De manière identique au comportement longitudinal, le comportement élastique est considéré être le même quel que soit le sens de sollicitation.

Sous contrainte tangente, le matériau montre également de l'élasticité jusqu'à l'atteinte d'une valeur limite assez faible. Le comportement est également fragile. La résistance du bois dans les plans LR et LT est plus faible que dans le plan TR. La rupture dans les plans LR et LT se produit avant car elle se traduit par une décohérence des cellules alors que dans le plan TR un cisaillement à proprement parlé des cellules est nécessaire : il est donc plus tenace.

Les différences de comportement élastique du bois dans les différentes directions précitées confèrent à celui-ci un comportement qualifié d'orthotrope. La similitude considérée parfaite à l'échelle de certains problèmes de mécanique des structures entre les comportements radial et tangentiel lui confère même un comportement qualifié d'isotrope transverse. Cependant, les différences fortes de comportement suivant les axes de sollicitations le distinguent particulièrement des autres matériaux.

La loi de comportement élastique attribuée généralement au bois prend alors la forme générale ci-dessous :

- PARTIE 4 - MODELISATION DU MATERIAU BOIS

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{TL} \\ \gamma_{LR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_L & -\nu_{LR}/E_L & -\nu_{LT}/E_L & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{RL}/E_R & 1/E_R & -\nu_{RT}/E_R & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{TL}/E_T & -\nu_{TR}/E_T & 1/E_T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{RT} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{TL} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{LR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \sigma_{RT} \\ \sigma_{TL} \\ \sigma_{LR} \end{bmatrix}$$

Avec

E_i = le module d'Young dans la direction i .

G_y = le module de cisaillement dans différents plans.

ν_y = les coefficients de Poisson.

Cette description mathématique du comportement considère donc le matériau comme homogène. Lorsqu'un volume suffisant de bois est considéré, la mécanique des milieux continus permet alors de décrire les champs de déformations ce qui donne une image de la variation des champs de contraintes dans les objets modélisés. Le comportement d'éléments de structures évolués tels que des poutres à inertie variable en bois lamellé-collé a pu, par ce biais, être cerné en termes de dimensionnement. Il a fallu pour ce faire adjoindre des critères de rupture basés sur l'analyse des contraintes afin de prévoir les ruptures fragiles en traction transversale et en cisaillement par exemple.

Cette approche de description du bois est donc intéressante pour modéliser le comportement de partie de structure demeurant dans le domaine élastique ou en limite. La plupart du temps, c'est la méthode des éléments finis qui est retenue pour conduire à la résolution et l'exploitation des résultats.

2. CRITERES DE RUPTURE ET MODELISATION DU COMPORTEMENT NON LINEAIRE

2.1. Critères de rupture, écoulement et localisation des contraintes

L'idéalisation du comportement du bois précédente est rendu possible par le fait que celui-ci est considéré comme homogène (figure 77). Redington [27] considère qu'à partir d'une échelle inférieure à 10 cm, il est difficile de considérer le bois comme un matériau continu. Cette échelle, en correspondance avec l'exemple de poutres à inertie variable citée précédemment, peut cependant être affinée avec précaution lorsque les problèmes traités s'approchent de bois sans défaut. Dans bien des problèmes mécaniques à résoudre avec le bois, l'approche du comportement élastique n'est pas suffisante. Il est souvent nécessaire de dépasser les limites d'élasticité du matériau pour apporter une réponse : il faut alors définir des critères de rupture et d'écoulement. Sans reprendre la bibliographie importante conduite sur le sujet et synthétisée par Nahas [28], Kasal et Leichti [29] ainsi que dans de nombreuses thèses comme encore récemment Toussaint[30], il est intéressant de refaire un point sur la

- PARTIE 4 - MODELISATION DU MATERIAU BOIS

conceptualisation de ces approches et leur compatibilité avec la modélisation des ancrages.

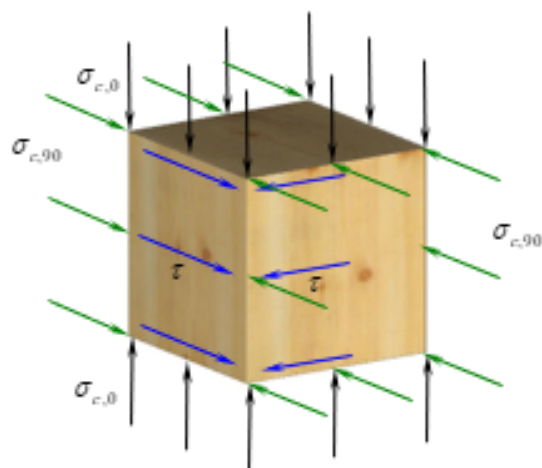


Figure 77 : État de contrainte homogène sur un volume de bois représentatif.

Pour prévoir la limite de résistance du bois à l'intérieur d'un volume fini, il est tout d'abord supposé que cela est possible à partir de la connaissance des pressions homogènes, normales ou tangentes sur le volume. Il est alors admis qu'une contrainte ou que la combinaison de différentes contraintes conduit à la rupture ou à faire entrer dans le domaine des déformations irréversibles le matériau. Pour définir ces limites, des essais de caractérisation doivent être réalisés. Cependant, le nombre de combinaisons d'états de contraintes sur le volume étant infini, il est impossible de définir de manière systématique chacune. Il est alors supposé que la connaissance des limites de quelques combinaisons suffit au calage d'un modèle pouvant interpoler ces quelques valeurs limites pour d'autres états de contraintes. Ces modèles prennent généralement la forme de quadriques dans l'espace des contraintes et sont appelés critères de rupture. Suivant leurs formulations mathématiques, un certains nombres de paramètres, gérant principalement les interactions entre les contraintes, sont à définir. Ce type d'approche donne en général de bons résultats sur des matériaux très homogènes comme les métaux considérés, généralement, comme isotrope ou les matériaux composites plus souvent anisotropes. Le caractère fortement anisotrope du bois, ses propriétés fragiles et ductiles, rendent beaucoup moins facile la généralisation. L'approche des limites élastiques par un seul critère est maintenant reconnue comme impossible. Il est, aujourd'hui, utilisé plusieurs critères dans les modèles les plus avancés pour tenter de cerner au mieux cet espace limite. L'utilisation de formes mathématiques continues pour décrire l'espace limite a souvent été choisie de manière pratique en termes de dérivabilité plutôt que physique. Ceci conduit dans bien des cas à des aberrations comportementales importantes sous certaines sollicitations. Fleischmann et al [31] ont utilisé ce type d'approche pour modéliser un essai sur une ferme (figure 78). L'écart observé entre la modélisation et

- PARTIE 4 - MODELISATION DU MATERIAU BOIS

L'expérimentation laisse entrevoir la difficulté selon eux de la prise en compte de l'interaction compression transversale et cisaillement.

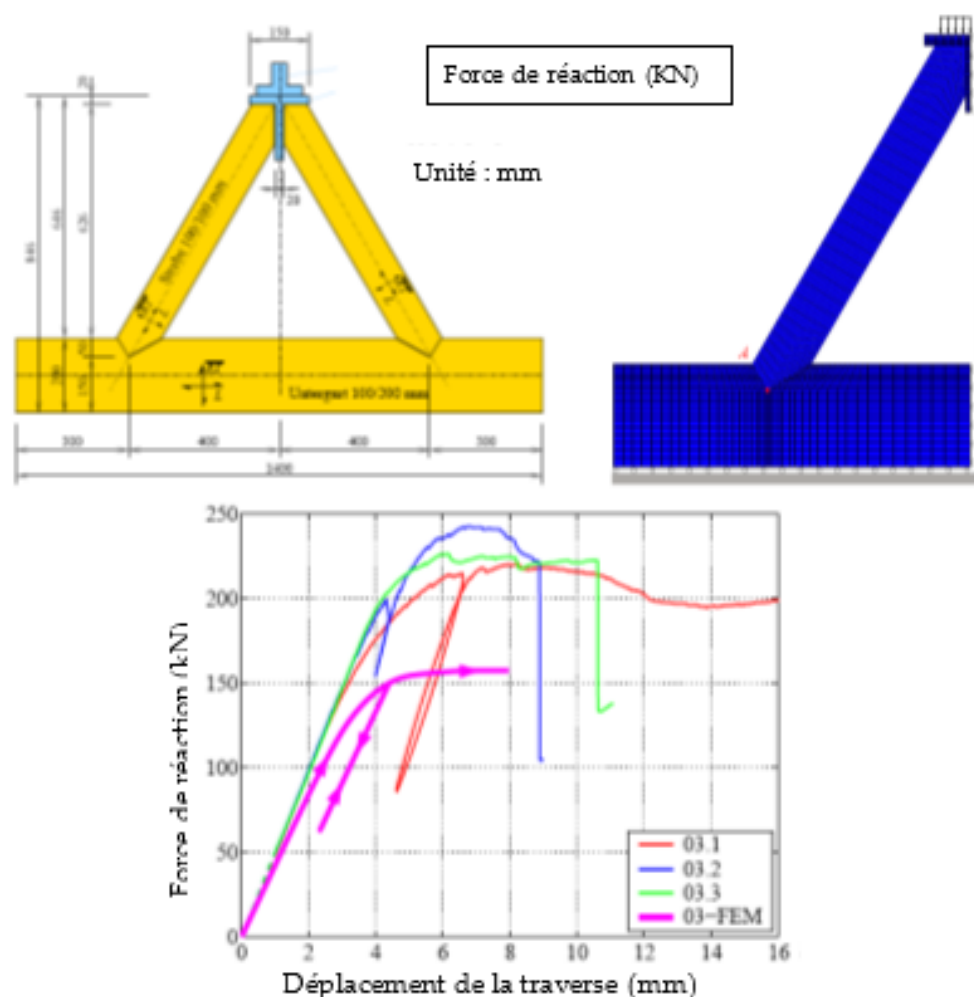


Figure 78 : Modélisation du comportement non linéaire d'un emboîtement en utilisant le modèle multi-surface de Mackenzie-Helnwein et Eberhardsteiner (Fleischmann et al. 2007) [31].

La mise en évidence de ces problèmes a conduit certains à renoncer à ces formes mathématiques et à proposer des surfaces de rupture à plusieurs facettes. Ces critères portent le nom de multi-surfaces. Grosse [32] et Grosse Rautenstrauch [33] ont développés un critère de ce type qui semble donner, sur les applications réalisées, des résultats satisfaisants. Il est à noter que, dans les applications traitées, il est très difficile de rester dans les champs de l'hypothèse d'une contrainte homogène et de son volume minimum car, pour suivre les variations violentes des déformations, il est obligatoire d'affiner le maillage. Ceci constitue une première limite lorsqu'il est nécessaire d'approcher ce qui se passe au niveau des assemblages de structures bois comme les ancrages.

- PARTIE 4 - MODELISATION DU MATERIAU BOIS

La seconde limite de ces approches réside dans la complexité de réalisation de tests de caractérisation qui s'accroît lorsque des états de contraintes multiaxiaux sont envisagés. Mackenzie-Helnwein et Eberhardsteiner [34] ont mis au point une machine d'essais remarquable qui permet de produire des états de contraintes bi axiaux (figure 79). Lorsque des interactions de contraintes au caractère fragile sont testées, l'extrême précaution de réalisation des éprouvettes leur permet d'obtenir sur des volumes représentatifs des ruptures homogènes au volume. Cependant, il est à noter la très grande variabilité des résultats. En revanche, lorsque les sollicitations deviennent ductiles, ils sont confrontés aux problèmes de localisation des contraintes : la rupture n'est alors plus homogène dans le volume.

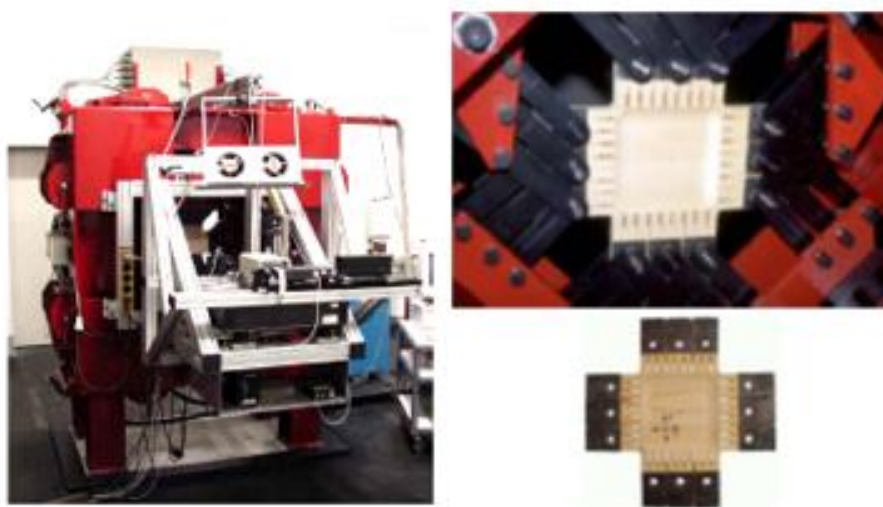


Figure 79 : Dispositif expérimental permettant de réaliser des essais de caractérisation du bois bi-axiaux (Mackenzie-Helnwein et Eberhardsteiner [34]).

Ceci peut trouver deux explications probablement liées : la première est la variabilité, en termes de résistance, du matériau qui reste importante et qui produit des points de faiblesse dans l'éprouvette de bois parfaite alors qu'elle est considérée comme homogène (il est très difficile de faire mieux). La seconde est qu'il n'est peut être pas possible d'expliquer la rupture localisée dans le bois à partir d'un état de contrainte homogène.

La modélisation du comportement du bois, en dehors du domaine élastique, ne se résume, d'autre part, pas à la seule définition d'une limite pour un état de contraintes donné. Une fois ce point de fonctionnement obtenu, il est nécessaire d'expliquer comment la matière «s'effondre». Lorsque le comportement ductile du bois est activé, après l'atteinte des limites élastiques, celui-ci se déforme dans des directions privilégiées. La problématique de localisation des contraintes, soulevée précédemment, rend très difficile la définition des directions d'effondrement même dans le cas de sollicitations élémentaires. Mackenzie-Helnwein et Eberhardsteiner [34]

- PARTIE 4 - MODELISATION DU MATERIAU BOIS

précisent que, dans leurs expérimentations, ils n'ont quasiment jamais pu dépasser les seuils de plasticité.

De manière générale, l'écoulement des matériaux est régi théoriquement par une fonction mathématique, appelée fonction d'écoulement. En associant cette fonction à une autre fonction, appelée fonction d'écrouissage, qui régit l'évolution de la surface de charge (critère de rupture), la direction et l'intensité des déplacements plastiques peuvent être déterminées en vertu des principes de la thermodynamique.

Toute la difficulté de cette approche réside dans la définition de ces fonctions et de leur vérification expérimentale qui, comme il a été indiqué précédemment, est extrêmement difficile à conduire. Dans la majeure partie des travaux réalisés sur le bois, par manque de connaissances, la fonction d'écoulement est considérée être la même que la fonction de charge : le critère de ruine est dit associé.

L'ensemble de ces considérations semble indiquer que, pour la modélisation des ancrages où des déformations plastiques locales importantes se produisent, l'utilisation de critères de rupture ne soit pas la bonne voie. L'état de développement et d'implémentation de ces approches dans les codes de calculs disponibles sont, d'autre part, difficilement abordables.

2.2. Modélisation du bois comme une structure

La bibliographie ne montre pas d'application vraiment convaincante de problèmes traités à l'aide d'une approche par critères de rupture et contraintes homogènes où le bois est fortement sollicité localement. A cette échelle, suivant les essences de bois considérées, les hypothèses de continuité et de contraintes homogènes sont assez rapidement mises en défaut. Ceci indique simplement qu'il est sans doute difficile d'expliquer l'effondrement du bois à partir de contraintes homogènes.

Dans la littérature, il peut être trouvé que, pour certains problèmes de physique atomiques ou moléculaires, lorsque les théories continues ne peuvent plus s'appliquer, le milieu peut être idéalisé par une structure approximant la continuité. Pour cela, il est nécessaire que le milieu présente un schéma structurel élémentaire répétable. Ces structures ressemblant généralement à des treillis sont appelées « Lattice model ». La mise en œuvre de cette théorie sur le bois a fait l'objet de travaux récents par Davids [35], Fournier [36] et Reichert [37] [38] [39] pour modéliser la rupture fragile du bois. Il ne s'agit pas ici d'utiliser cette méthode mais de transposer le principe à la modélisation du bois non linéaire en considérant des éléments du « Lattice model » plus évolués.

Il peut tout d'abord être remarqué que, à l'échelle de quelques millimètres, le bois d'épicéa, souvent utilisé en construction avec les ancrages présentés, comme de nombreux résineux, possède une structure alternée répétitive de couches liée à sa croissance. En effet, dans le cerne, le bois initial possède une densité bien différente de celle du bois final. En faisant, dans un premier temps, abstraction de la courbure des cernes, le bois peut être vu comme une alternance de couches d'éléments ayant une

- PARTIE 4 - MODELISATION DU MATERIAU BOIS

certaine rigidité espacées par un matériau plus poreux est densifiable : ceci constitue le schéma structural élémentaire répétable. Dans cette approche, il apparaît alors plus aisé de donner à chacun des éléments répétables, pouvant constituer le milieu, un comportement ainsi qu'un critère de rupture et d'écoulement facilement identifiable plutôt qu'un critère en contraintes homogènes. La figure 80 illustre le concept.

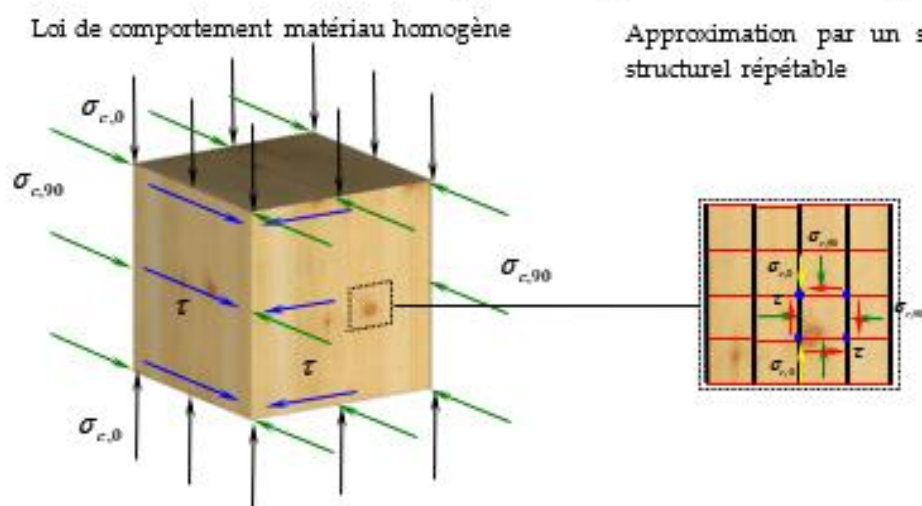


Figure 80 : Approximation du comportement local dans le bois par la constitution d'une structure faite d'éléments simples au comportement élémentaire.

L'approximation réside alors dans le fait que le milieu, qui n'est pas reconnu comme homogène mais qui est tout de même cohérent en l'absence de fissure, ne retrouve pas tous les couplages qui peuvent exister, a priori, de façon plus ou moins marquée. La figure 81 présente la retranscription de la déformation du milieu. Le comportement élémentaire, plus moins sophistiqué, de chaque constituant peut également jouer un rôle particulier dans l'effondrement de la structure.

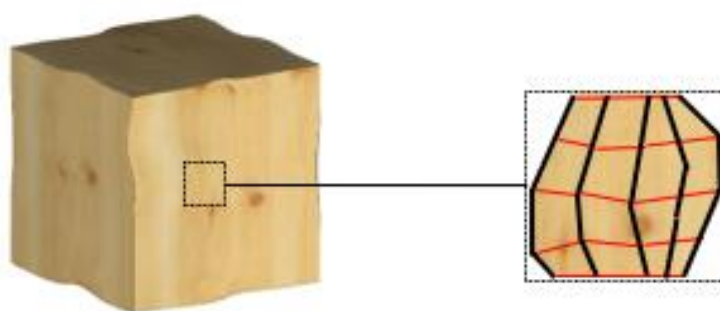


Figure 81 : Approche de la déformation du milieu modélisé.

La figure 82 tente de représenter, de manière imagée et plus abstraite, le défi qui est, en fait, posé pour modéliser l'effondrement local du bois. Par exemple, pour

- PARTIE 4 - MODELISATION DU MATERIAU BOIS

prévoir la ruine d'une habitation, composée d'éléments porteurs comme des murs, des poteaux ou des poutres, deux choix peuvent être fait.

Le premier choix est de modéliser à la manière d'un ingénieur l'objet. Chaque élément de la structure ne pouvant être modélisé, un choix est fait de ne garder, par expérience, que ceux qui auront une réelle influence sur l'effondrement. Ainsi, les poteaux et les poutres sont modélisés comme des éléments filaires et les murs comme des plaques. Des conditions aux limites adéquates sont également données pour que le comportement s'approche le plus du comportement réel. Dans cette démarche, l'expérience est essentielle pour cerner la mécanique de la structure. N'importe quel scénario de chargement peut alors être envisagé.

Le second choix est de définir la structure par quelques points de son enveloppe et d'établir sa rigidité, à partir de ces points, à la manière d'un élément fini. Ceci apparaît, évidemment, plus simple pour modéliser la structure par rapport au choix précédent. En revanche il est nécessaire d'élaborer la fonction de charge, la fonction d'écoulement et la fonction d'érouissage de ce volume de maison homogène. Il apparaît, alors, extrêmement complexe de prendre en compte tous les chemins d'effondrements possibles à l'intérieur de l'ouvrage d'un point de vu mathématique sans effectuer un nombre d'essais importants et extrêmement complexes.

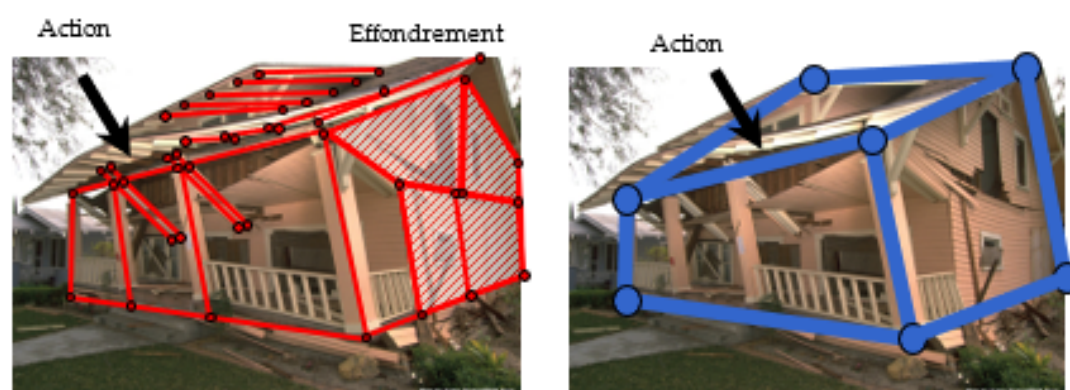


Figure 82 : Prévion de l'effondrement d'un ouvrage par idéalisation de la structure porteuse ou par établissement de sa loi de comportement et d'écoulement.

Pour modéliser les déformations locales du bois autour des broches dans des assemblages de type tiges, Bocquet [24] a mis en œuvre, sans le conceptualiser, ce principe à l'aide d'un code de calculs éléments finis CAST3M [40]. Le schéma structurel élémentaire répétable était composé de poutres couplées entre elles par deux éléments de joints superposés. Les poutres avaient un comportement élasto-plastique pour simuler le comportement du bois en compression dans le sens du fil. Les joints simulaient le comportement du bois en compression transversale élasto-plastique avec

- PARTIE 4 - MODELISATION DU MATERIAU BOIS

une interaction en cisaillement. Le modèle permettait de simuler l'enfoncement d'un organe circulaire rigide à l'intérieur d'une tranche de bois en deux dimensions. Dans ce travail, Bocquet [24] n'a pas fait référence à la méthodologie des « Lattice model ». Récemment, Toussaint [30] a amélioré l'approche de Bocquet en remplaçant le comportement élémentaire des éléments de joint par une mousse de type Crushable Foam décrite par Gibson & Ashby [41], [42] qui est implémentée dans le code de calculs ABAQUS. En substituant cette mousse aux éléments joints, Toussaint [30] modélise en 2D le formage et la mise en précontrainte d'assemblages bois. Grâce à l'élément mousse, la densification du bois est intégrée. Toussaint qualifie ce modèle de structural et le situe en termes de modélisation à une échelle mésoscopique (entre micro et macro) car l'influence de l'alternance des cernes est, selon lui, prise en compte.

Les résultats obtenus, principalement sur des sollicitations de compression, conduisent à retenir cette approche et à la mettre en œuvre pour les besoins de la modélisation des ancrages en trois dimensions.

2.3. Intégration du modèle structural du bois dans Abaqus

Parmi les différents codes de calculs disponibles sur le marché, le code de calcul ABAQUS a été retenu car le modèle mousse Crushable Foam (Deshpande [43]) était déjà implémenté. Ce code étant également reconnu pour modéliser le formage de l'acier, il apparaissait à l'évidence adapté à la modélisation des ancrages.

Pour modéliser le milieu en trois dimensions, le schéma structural élémentaire répétable est constitué de quatre cubes de mousse (élément C3D20R d'ABAQUS) et d'une poutre (élément B32 d'ABAQUS). Lorsque ce schéma est répété, les cubes qui ont des arrêtes communes, sans présence de poutre sur ces arrêtes peuvent alors être confondus. La figure 83 présente le schéma structural répétable ainsi que la modélisation d'un cube de bois. Suivant la géométrie du bord des pièces à modéliser, les cubes pourront être remplacés par des pyramides.

En première hypothèse, il est supposé que, dans le bois, la capacité des fibres (empilement de cellules) à transmettre des efforts de traction et de compression est assurée par la poutre. Sa section carrée ou rectangulaire est considérée égale à la surface de bois représentée. Le comportement longitudinal du bois n'est donc pas affecté par le comportement transversal. Toussaint [30] a mis en évidence que la résistance en traction longitudinale n'était pas affectée par la densification en dessous d'un seuil approchant les 55%. Ceci laisse une marge importante de fonctionnement au modèle. Malgré le fait qu'il n'y ait pas d'interaction prise en compte par la séparation du comportement longitudinale du reste, il est facile de comprendre que, lorsque les volumes de mousse se réduiront, le comportement en compression de poutres stabilisées par la mousse sera affecté.

En second lieu, le volume de bois non matérialisé par la poutre est occupé par des cubes de mousse. Ces cubes considèrent le volume de bois représenté comme isotrope. En effet, la particularité du comportement du bois dans le sens longitudinal

- PARTIE 4 - MODELISATION DU MATERIAU BOIS

étant principalement pris en compte par les barres, il est considéré que la densification de la matière ligneuse et sa résistance sont les mêmes qu'elles que soient les directions.

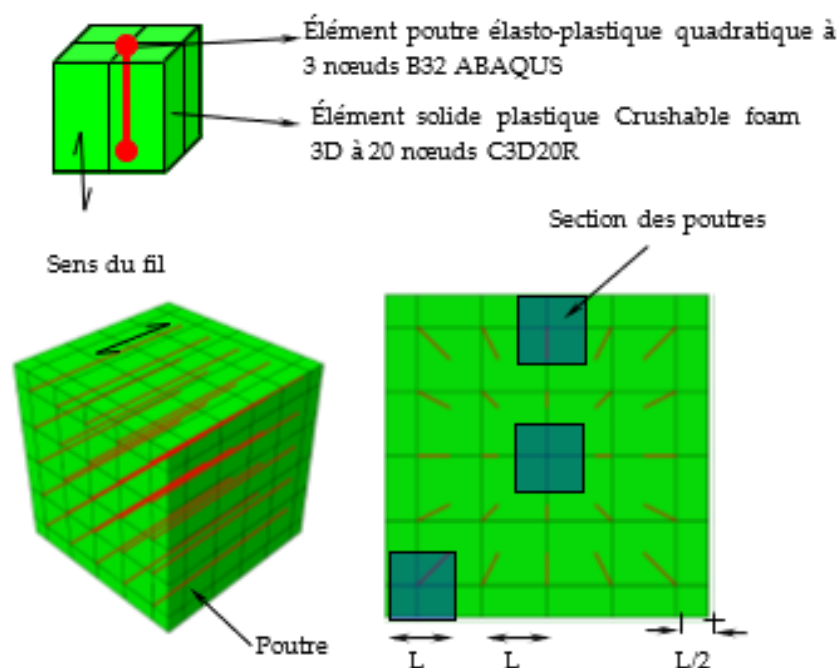


Figure 83 : Modèle structural 3D du bois par copie d'un schéma structural élémentaire répétable associant des éléments poutre et des cubes de mousse.

Le comportement longitudinal étant, au final, la composition du travail de la mousse et des poutres, le comportement attribué aux poutres doit être plus faible que celui du bois équivalent : le risque serait alors de disposer globalement d'une rigidité et d'une résistance supérieures. En ce sens, il peut être dit que les poutres représentent principalement le comportement du bois final. Lorsque l'espacement entre les poutres s'approche de la taille des cernes, le modèle idéalise la structure d'un bois aux cernes marqués.

Dans cette première approche de modélisation du bois en trois dimensions, les sections des poutres ainsi que leurs orientations restent basiques. Elles pourraient devenir, à certaines échelles, des paramètres permettant d'intégrer de façon schématique la courbure des cernes.

L'intégration de cette approche dans un code de calculs augmente un peu le nombre de degrés de liberté par rapport à un maillage classique.

3. CARACTERISATION DU BOIS EN COMPRESSION

Pour son fonctionnement, le modèle structural construit dans ABAQUS® nécessite l'introduction de lois de comportement dans les poutres et les volumes de

- PARTIE 4 - MODELISATION DU MATERIAU BOIS

mousse. Ces lois doivent pouvoir prendre en compte les variations de comportement dues aux variations de masse volumique. Il est donc nécessaire de caractériser le comportement du bois dans le sens longitudinal (sens du fil) et dans le sens transversal : dans l'état actuel du modèle, il ne peut pas être fait de distinction entre les directions radiale et tangentielle. Au niveau du modèle, le comportement transversal est uniquement géré par la mousse avec pour caractéristique principale l'évolution de sa résistance en compression en fonction de sa déformation sans variation de volume. Dans le sens longitudinal, la réponse du modèle associe la réponse de la mousse avec le comportement des poutres. La loi de comportement des poutres doit donc être déduite du comportement longitudinal et transversal réel du bois pour simuler au mieux ce dernier.

L'état de l'art donne différentes solutions pour établir des lois de comportement uniaxiales en compression dans le sens du fil et le sens transversal du bois avec des avantages et des inconvénients pour réaliser cette caractérisation (Tabarsa et Chui [44] , François [45] , Bocquet [24]). Les préconisations géométriques des divers protocoles normatifs mondiaux de caractérisation sont produites pour obtenir des caractéristiques ou des limites élastiques, ces protocoles sont donc peu adaptés à l'acquisition de l'évolution du comportement post élastique du matériau. Suivant l'orientation du fil, différents phénomènes d'instabilité et d'écoulement de la matière se produisent une fois le comportement réversible passé. Récemment Toussaint [30] a repris l'approche expérimentale de Bocquet [24] qui avait effectué des essais de compression sur des cylindres de bois dans une enceinte confinée. Ce dispositif permet d'éviter les effets de bandes de cisaillement qui apparaissent en compression dans le sens du fil ou de glissement relatif des cernes dans le sens transversal. Cette approche permet d'atteindre facilement des seuils de densification importants. Toussaint [30] a amélioré l'enceinte de confinement proposée par Bocquet en réalisant un chambrage en PTFE afin de limiter les frottements qui peuvent se développer, spécialement en fin de la phase de densification. Grâce à ce montage, Toussaint [30] a proposé une loi de comportement uniaxiale en compression transversale à 7 paramètres sur du bois d'épicéa.

Dans un premier temps, les caractéristiques de cette loi sont rappelées, car cette dernière peut directement être retenue dans cette première phase de modélisation des ancrages. En s'inspirant de la forme mathématique de cette loi, le comportement longitudinal est caractérisé après une phase d'expérimentation conduite de façon similaire à celle de Toussaint[30] . Le montage est d'ailleurs encore amélioré. Enfin, après avoir établi la forme générale de la loi de comportement de l'épicéa dans le sens longitudinal, les paramètres à introduire dans le comportement des poutres sont déterminés. La campagne d'essais étant réduite pour assoir de manière statistique cette loi, une proposition simple est faite pour moduler le comportement de cette loi en fonction de la densité du bois.

4. LOI DE COMPORTEMENT EN COMPRESSION TRANSVERSALE

- PARTIE 4 - MODELISATION DU MATERIAU BOIS

Le comportement en compression transversale du bois d'épicéa se caractérise par une phase élastique qui traduit la déformation élastique de l'empilage des trachéides (juxtaposition de « tubes »). A partir d'un certain seuil de contrainte, généralement le 7^{ème} rang de trachéides du bois de printemps s'effondre en compression Tabarsa et Chui [46] , Rabaud [47] . Une phase d'effondrement et de densification du bois de printemps se développe alors. Une faible augmentation de la contrainte est observée alors que la déformation augmente de façon très importante. Le volume des vides est alors comblé jusqu'à ce que la masse volumique du bois de printemps atteigne celle du bois d'été. Ce seuil est appelé ε_d par Toussaint[30] . A partir de ce seuil, la densification du bois final se produit assez rapidement. L'évolution exponentielle de la contrainte dans cette phase traduit le phénomène de compression de la matière ligneuse. La loi proposée par Toussaint[30] est présentée sur la figure 84.

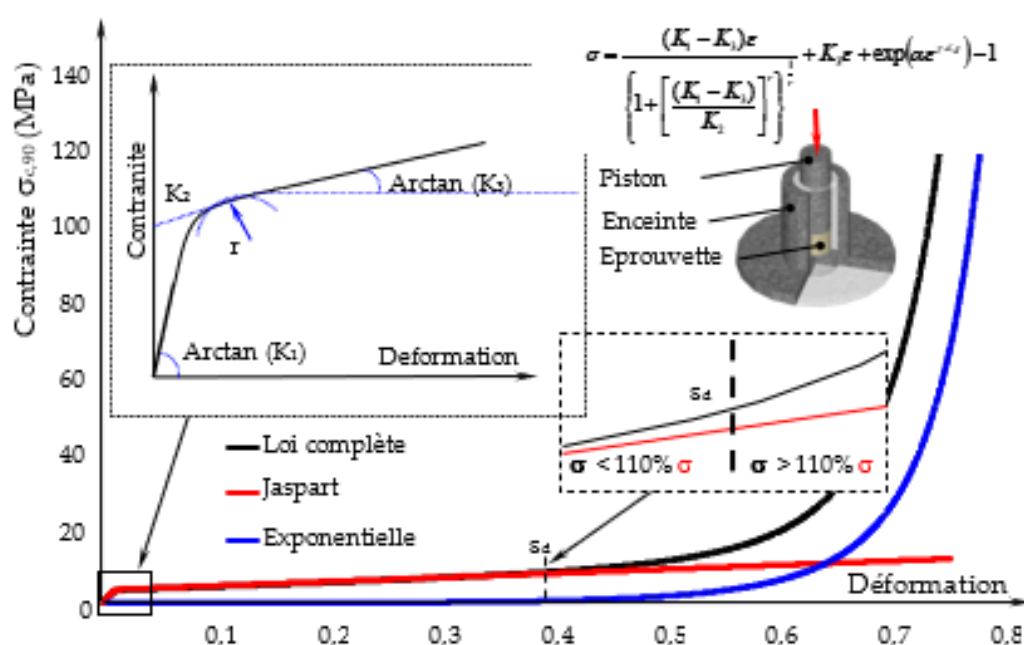


Figure 84 : Loi de comportement en compression transversale établie par la superposition d'une fonction exponentielle à l'équation de Jaspart[12] .

Après une campagne d'essais étendue, Toussaint[30] a proposé les paramètres suivants pour que la loi s'exprime en fonction de la masse volumique du bois ρ à 12% d'humidité.

$$\sigma = \frac{(K_1 - K_2)\varepsilon}{\left[1 + \left[\frac{(K_1 - K_2)\varepsilon}{K_2}\right]^r\right]} + K_2\varepsilon + \exp(\alpha\varepsilon^{\nu_d}) - 1$$

Avec

- PARTIE 4 - MODELISATION DU MATERIAU BOIS

$$K_1 = 453 \text{ MPa}$$

$$K_2(\rho) = 0,0325\rho - 6,5941 \text{ MPa}$$

$$K_3(\rho) = 0,03745\rho - 8,2875 \text{ MPa}$$

$$\alpha = 12,25$$

$$\gamma = 8,1169$$

$$r = 7,42$$

La différence entre le comportement radial et tangentiel étant tellement peu significative sur les essais réalisés qu'une seule loi globale a été proposée. L'auteur mentionne que sa loi pourrait être améliorée car le protocole n'a pas permis de déterminer une variation significative du module d'élasticité initial en fonction de la densité (paramètre K_1). En effet, le défaut majeur de ce test réside dans l'imprécision des mesures des déformations initiales qui sont très faibles vu la hauteur de l'éprouvette (30 mm). Ce n'est pas le montage qui est responsable, mais le fait que la mise en contact des extrémités usinées de l'éprouvette apporte une déformation initiale qui nuit à la mesure du déplacement du piston, censé représenter la déformation de l'éprouvette. Les essais réalisés étant peu nombreux avec des masses volumiques élevées, l'auteur indique que des écarts peuvent être observés dans la pratique lorsque des masses volumiques dépassent 450 kg/m^3 .

Par rapport à son utilisation dans les modèles visés par cette étude, il ne faudra pas perdre de vue que cette évolution est obtenue à partir de tests réalisés sur du bois sans défaut et sans fissure. Afin d'affiner les résultats de calculs conduits dans ce travail, le module d'élasticité initial sera évalué par une interpolation des modules d'élasticité $E_{90,max}$ indiqués dans la norme EN 338.

5. LOI DE COMPORTEMENT EN COMPRESSION LONGITUDINALE

La figure 85 présente l'évolution du processus de compression d'une éprouvette d'épicéa dans le sens du fil réalisée dans une enceinte quasi similaire à celle utilisée par Toussaint[30]. Après une phase de mise en contact des extrémités de l'éprouvette, qui se traduit par une évolution croissante du module, une phase élastique du comportement du bois peut être observée. Cette phase se termine lorsque les trachéides d'une même bande de cisaillement s'effondrent soit par « flambement » Holmberg [48] soit par leur rupture à proprement parlé : ce type de rupture se traduit par un enchevêtrement de ces dernières. Une phase de densification par progression d'un front d'effondrement se déroule alors à un niveau de contraintes quasi constant jusqu'à ce que le volume des vides soit comblé. Une fois ce volume comblé, c'est la matière ligneuse qui est mise en compression ce qui se traduit, comme dans le comportement transversale, par une évolution exponentielle du module. Que la matière soit comprimée dans le sens longitudinal où dans le sens transversal, le

- PARTIE 4 - MODELISATION DU MATERIAU BOIS

comportement de la matière ligneuse doit vraisemblablement être similaire. Il peut être remarqué que le seuil de densification ε_d défini par Toussaint [30] peut être retrouvé sur l'allure présentée à la figure 85.

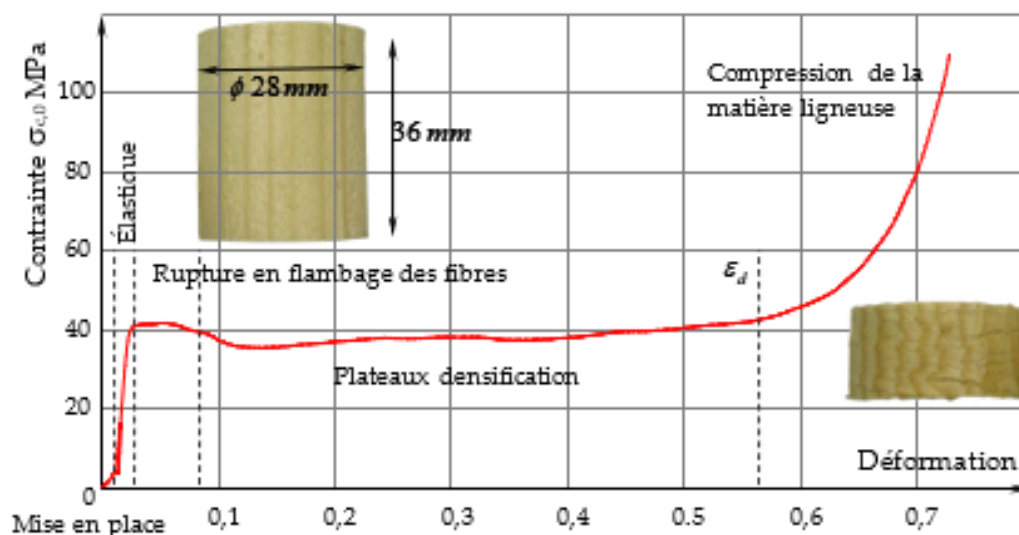


Figure 85 : Allure générale du comportement d'épicéa en compression uniaxiale longitudinale confinée.

Cette constatation de similitude du comportement du bois dans une enceinte confinée, dans le sens de longitudinal et transversal, justifie la superposition des comportements proposés dans le modèle structural.

5.1. Montage de compression et essais

Dans le but de caractériser plus précisément le comportement d'épicéa en compression longitudinale, il est choisi de conduire une série d'essais. Bien que le protocole en enceinte confinée exposé ci-dessus avec des éprouvettes cylindriques de petites tailles présente le défaut de ne pas permettre l'obtention avec précision du module d'élasticité du matériau dans la phase initiale, il est tout de même retenu. Ce module sera tiré de la bibliographie dans cette première étape de modélisation des ancrages en interpolant les valeurs de $E_{0,mean}$.

Pour parfaire la géométrie des éprouvettes, la partie cylindrique de celles-ci est usinée à l'aide d'un tour à commandes numériques. La mise à longueur des éprouvettes est réalisée grâce à deux scies montées en parallèle sur un arbre de toupie, ce qui permet d'obtenir à la fois deux surfaces bien parallèles pourvues d'un état de surface le plus propre possible. Dix éprouvettes sont usinées dans des avivés de Picea Abies sans défaut, avec une masse volumique moyenne de $466,5 \text{ kg/m}^3$ (tableau 16). Les éprouvettes utilisées sont des cylindres de 28 mm de diamètre et de 36 mm de hauteur. Pour confiner les éprouvettes, un cylindre d'acier est utilisé (figure 86). Ce

- PARTIE 4 - MODELISATION DU MATERIAU BOIS

dernier accueille des bagues en métal fritté introduites serrées dans le cylindre afin de limiter l'influence des frottements et permettre un glissement plus aisé du piston. Pour réduire au maximum les effets des frottements, un lubrifiant sec au PTFE est pulvérisé avant essai. L'effort est introduit par une machine universelle INSTRON[®] avec une cellule de charge de 100 kN en appuyant sur le piston en acier du montage. La prise de mesures du déplacement est effectuée à l'aide d'un système de mesures par analyse d'images VDM[®]. Ce système consiste à suivre le déplacement de cibles. Cette technique permet de mesurer le déplacement relatif (et la rotation) de deux objets (ensemble de plusieurs cibles) les uns par rapport aux autres. Sur l'image du dispositif d'essai en place sur la machine de la figure 86, le déplacement relatif de l'objet 2 par rapport à l'objet 3 mesure le raccourcissement de l'éprouvette. En effet, l'objet 2 est fixé sur le piston dont la raideur est suffisamment importante devant celle du bois pour négliger sa déformation. L'objet 3 mesure la déformation de la traverse de la machine qui n'est pas négligeable. L'objet 1 permet d'avoir un plan de mesures nécessaire à l'étalonnage du logiciel.

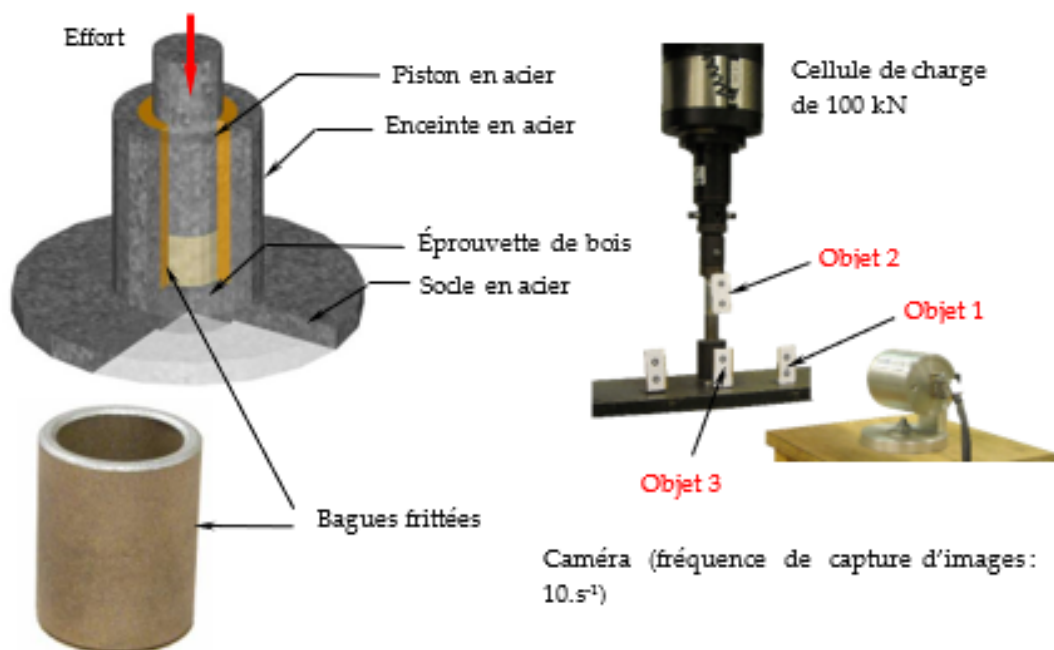


Figure 86 : Dispositif expérimental pour déterminer la loi de comportement du bois en compression longitudinale.

La figure 87 présente les résultats d'essais. L'évolution de la contrainte durant la phase de densification est plus oscillante que sur l'allure générale décrite précédemment. Ceci traduit que le front d'effondrement rencontre des zones plus résistantes dans la hauteur de l'éprouvette de manière aléatoire. La phase de sollicitation de la matière ligneuse en fin de plateau de densification apparaît évoluer plus rapidement que lorsque le bois est sollicité en compression transversale. A la

- PARTIE 4 - MODELISATION DU MATERIAU BOIS

différence de la compression transversale où la compression du bois final se produit lorsque le vide du bois initial est comblé, la densification du bois final se produit au fur et à mesure de la progression du front de densification. Dans cette première approche de modélisation des ancrages, ce phénomène qui mériterait des travaux plus approfondis et précis pour être parfaitement analysé restera ignoré.

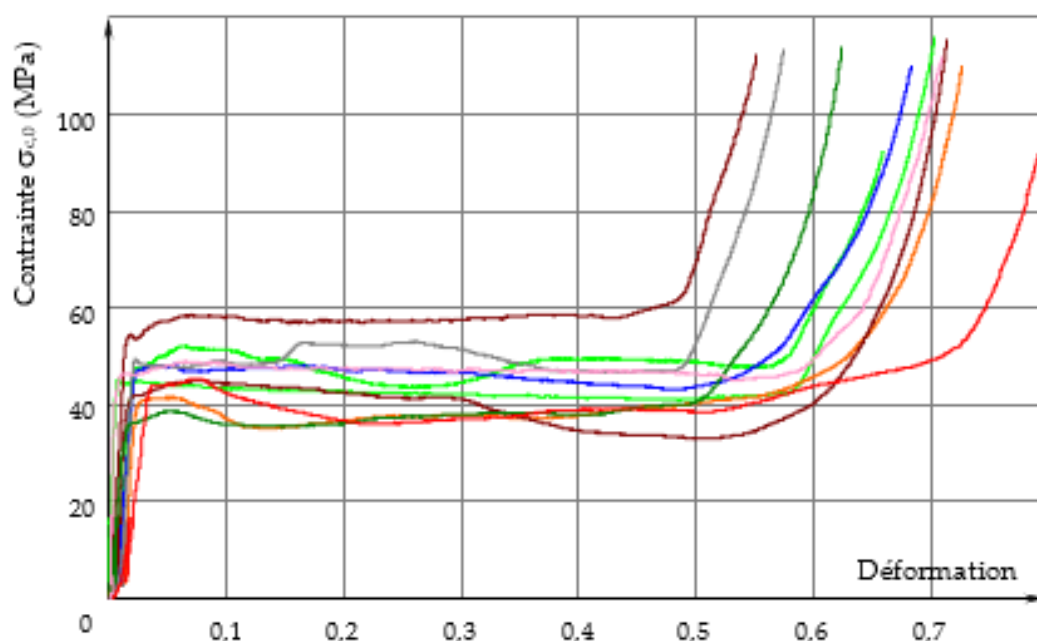


Figure 87 : Évolutions contraintes déformations du bois d'épicéa en compression longitudinale.

5.2. Modèle de loi et identification

En s'inspirant de la démarche de Toussaint [30], la fonction mathématique suivante est proposée pour modéliser l'évolution de la contrainte σ (rapport de l'effort appliquée sur la surface transversale de l'éprouvette) à la déformation ε (rapport du déplacement du piston sur la hauteur de l'éprouvette).

$$\sigma = \frac{(K_1 - K_3)\varepsilon}{\left[1 + \left[\frac{(K_1 - K_3)\varepsilon}{K_2}\right]^r\right]^{\frac{1}{r}}} + K_3\varepsilon + \exp(\alpha\varepsilon^7 + \beta) - \exp(\beta)$$

La première partie de l'équation qui est la fonction mathématique de Jaspert [12] modélise l'évolution jusqu'à 40% de déformation. L'identification de quatre paramètres est alors nécessaire pour caractériser un essai.

- PARTIE 4 - MODELISATION DU MATERIAU BOIS

$$\sigma = \frac{(K_1 - K_2)\varepsilon}{\left[1 + \left[\frac{(K_1 - K_2)\varepsilon}{K_2}\right]^r\right]^{\frac{1}{r}}} + K_2\varepsilon$$

K_1 définit le module d'élasticité du bois. K_2 définit le module dans la partie où le bois s'écrase, il peut être nommé module de densification. Géométriquement, K_2 est le décalage d'origine de la droite de la pente K_3 qui caractérise la phase de densification. La pente K_3 étant très faible, la valeur K_2 est assimilée dans ce qui suit à la résistance en compression du bois dans le sens longitudinal $f_{c,0}$. Le paramètre r caractérise la phase d'effondrement du matériau, c'est-à-dire le passage de la phase élastique à la phase de densification.

A cette première fonction est ajoutée une fonction d'allure exponentielle. La forme proposée par Toussaint [30] de cette deuxième fonction ne permettant pas de suivre la croissance de la contrainte dans la zone de densification plus rapide que dans le sens transversale, une autre fonction de la même forme est proposée.

$$\sigma = \exp(\alpha\varepsilon^\gamma + \beta) - \exp(\beta)$$

Cette fonction démarre à l'origine, elle suit tout d'abord une progression très lente jusqu'à la fin de la phase de densification puis croît de manière très importante. Les paramètres α , β et γ sont déterminés pour chaque essai.

Préalablement à l'identification de l'ensemble des différents paramètres présentés ci-dessus, la phase de mise en contact du montage avec l'éprouvette a été purgée des évolutions expérimentales. Un cycle charge décharge ayant été réalisée entre 10% et 40% de la charge estimée au seuil de résistance élastique, la déformation inélastique obtenue par la formule suivante a été retirée.

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{04} - \frac{4}{3}(\varepsilon_{04} - \varepsilon_{01}) \text{ avec :}$$

ε_i = Déformation inélastique.

ε_{04} = Déformation à 40 % de la contrainte limite élastique.

ε_{01} = Déformation à 10 % de la contrainte limite élastique.

Le tableau 16 présente les paramètres obtenus pour chaque essai, la loi de comportement moyenne en compression représentative des dix essais prend la forme suivante :

- PARTIE 4 - MODELISATION DU MATERIAU BOIS

$$\sigma = \frac{(K_1 - K_3)\varepsilon}{\left[1 + \left[\frac{(K_1 - K_3)\varepsilon}{K_2}\right]^r\right]^{\frac{1}{r}}} + K_3\varepsilon + \exp(\alpha\varepsilon^r + \beta) - \exp(\beta)$$

$$\sigma = \frac{6441,54\varepsilon}{\left[1 + [139,1\varepsilon]^{32,9}\right]^{0,03}} - 6,54\varepsilon + \exp(41,58\varepsilon^{5,75} + 0,75) - 2,12$$

Tableau 16 : Valeurs des paramètres de la loi de compression uniaxiale identifiée sur chaque essai d'épicéa.

	K_1	K_2	K_3	r	α	γ	β	ρ
Essai-1	7000	47	-2,45	40,84	120	10	2,8	494,19
Essai-2	6900	45	-10	53,11	22	2,7	-3,5	407,91
Essai-3	8000	45	-8	53,11	18	8,9	3,88	440,48
Essai-4	6700	48,9	-14	4	20	8	4	487,77
Essai-5	5000	44	-27	6,94	15,12	7,9	3,89	406,87
Essai-6	5300	49	-5	20,29	90	6,7	2,5	523,17
Essai-7	5500	55	3,19	15,70	80	4,5	-1	546,93
Essai-8	6150	36,2	4,8	82	22	2,7	-1,8	430,72
Essai-9	7800	46	-5	3	12	3	-1,8	455,66
Essai-10	6000	47	-2	50	16,7	3,1	-1,5	471,02
Moyenne	6435	46,3	-6,54	32,90	41,58	5,75	0,75	466,47
Écart-type	1022	4,73	9,15	26	39,4	2,85	2,9	4,7
COV	16%	10%	-140%	81%	95%	50%	390%	10%

6. IDENTIFICATION DU COMPORTEMENT DES POUTRES

6.1. Superposition des lois de compression longitudinale et transversale

En l'absence d'une campagne d'essais complète qui permettrait d'obtenir sous forme paramétrique l'évolution de la compression longitudinale en fonction de la masse volumique du bois jusqu'à la fin de la phase de densification, il est nécessaire de poser une hypothèse majeure permettant de déduire la loi de comportement des poutres à partir du comportement transversal du bois. Il est en effet supposé qu'en compression longitudinale, la contrainte au seuil de déformation ε_d est la même que la contrainte au seuil élastique dénommée $f_{c,0}$ et que la densification se produit sans variation de contrainte importante. En retenant la caractérisation du seuil de déformation plastique établie par Toussaint[30], il est supposé que le bois termine sa phase de densification au même seuil de densification quelque soit le sens de sollicitation en compression. Avec cette hypothèse, la loi de comportement des poutres est tracée sur la figure 88.

- PARTIE 4 - MODELISATION DU MATERIAU BOIS

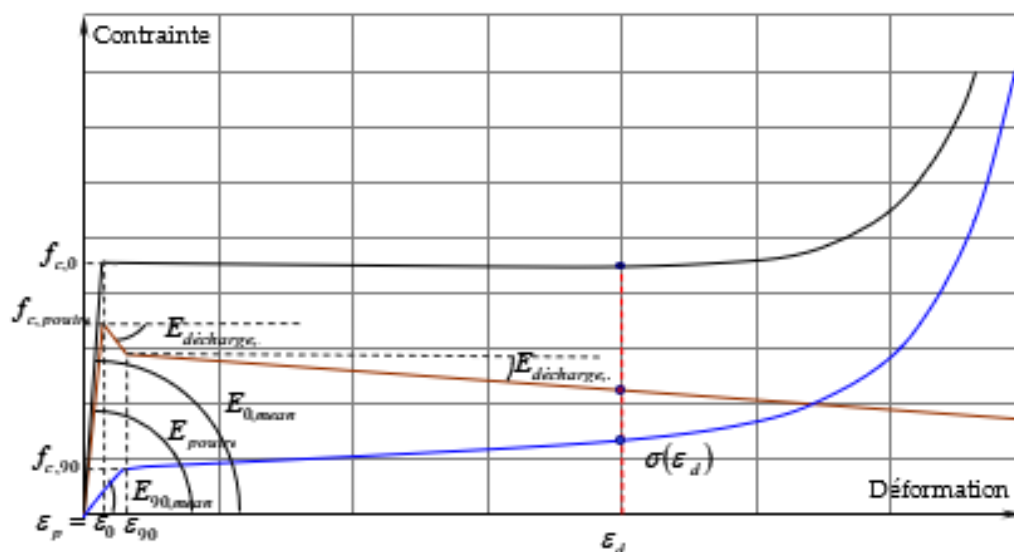


Figure 88 : Définition de la loi de comportement des poutres du modèle structural du bois.

En ayant posé comme hypothèse que l'aire de la section des poutres représentait la même aire que le volume de bois modélisé, la résistance en compression des poutres $f_{c,poutres}$ se trouve être égale à la résistance du bois en compression moins la résistance du bois en compression transversale au même seuil de déformation.

$$f_{c,poutres}(\rho) = f_{c,0}(\rho) - \frac{f_{c,0}(\rho)}{E_{0,mean}(\rho)} E_{90,mean}(\rho)$$

Le seuil de déformation élastique étant fixé, le module d'élasticité peut facilement être déduit comme il suit :

$$E_{poutres}(\rho) = \frac{f_{c,poutres}(\rho)}{\frac{f_{c,0}(\rho)}{E_{0,mean}(\rho)}}$$

Le bois étant plus souple dans le sens transversal que longitudinal, il est impératif que, passé le seuil de résistance élastique, le comportement des poutres devient adoucissant afin que la densification se produise à contrainte constante. Ce module d'adoucissement se déduit alors naturellement comme il suit :

$$E_{décharge,t}(\rho) = \frac{f_{c,0}(\rho) - f_{c,90}(\rho) - f_{c,poutres}(\rho)}{\frac{f_{c,90}(\rho)}{E_{90,mean}(\rho)} - \frac{f_{c,poutres}(\rho)}{E_{poutres}(\rho)}} = -E_{90,mean}$$

Cet adoucissement se poursuit alors jusqu'à l'atteinte du seuil de résistance élastique du bois en compression transversale. La densification du bois dans le sens longitudinale étant supposée se produire à contrainte constante, une seconde phase

- PARTIE 4 - MODELISATION DU MATERIAU BOIS

adoucissante peut alors être définie pour atteindre le point de fonctionnement indiquée par l'hypothèse du seuil de densification. Le module suivant peut alors être déduit de la composition des lois :

$$E_{décharg,e,2}(\rho) = \frac{f_{c,0}(\rho) - f_{c,poutre}(\rho) - E_{décharg,e,1}(\rho) \cdot \left(\frac{f_{c,90}(\rho)}{E_{90,mean}(\rho)} - \frac{f_{poutre}(\rho)}{E_{poutre}(\rho)} \right) - \sigma(\varepsilon_d(\rho))}{\varepsilon_d(\rho) - \frac{f_{c,90}(\rho)}{E_{90,mean}(\rho)}}$$

Le comportement en compression des poutres apparaît alors comme globalement adoucissant avec un comportement particulier une fois passé le seuil de résistance élastique. Il est intéressant de remarquer sur la figure 87 qui présente les essais en compression réalisés, qu'une légère chute de la résistance apparaît brutalement immédiatement après avoir atteint la limite élastique. La différence de modules d'élasticité qui existe entre le bois final et le bois initial dans un bois résineux comme l'épicéa confère un effet composite au bois. Le bois final par différence de rigidité absorbe plus de contraintes, lors de son effondrement, une partie de la pression est alors reprise par la mousse : suivant sa rigidité, celle-ci nécessite un déplacement plus ou moins important avant d'équilibrer la pression ce qui laisse apparaître ce comportement post pic de résistance. En intégrant une géométrie particulière du maillage retranscrivant des particularités de l'anatomie du bois tels que la présence de rayons ligneux, la longueur des trachéides ainsi qu'une distribution spatiale de la résistance basée sur une distribution statistique, il serait possible d'affiner la loi de comportement des poutres. Elles traduisent en fait le comportement du bois final dans le modèle structural. Ceci est pour l'objectif de ce travail cependant hors sujet.

Afin de produire la loi de comportement des poutres pour différentes masses volumiques, les paramètres des valeurs remarquables $f_{c,poutre}(\rho)$, $E_{poutre}(\rho)$, $E_{décharg,e,1}(\rho)$ et $E_{décharg,e,2}(\rho)$ de la loi de comportement des poutres sont tirés de la bibliographie :

Modules d'élasticité du bois en structure :

$$E_{0,mean}(\rho) = 43,722\rho - 7904,33 \quad \text{EN 338 [49]}$$

$$E_{90,mean}(\rho) = 1,4484\rho - 259,81 \quad \text{EN 338 [49]}$$

Résistance moyenne du bois sans défaut :

$$f_{c,0}(\rho) = 0,34\sigma_{yy} \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right) \quad \text{Avec } \rho_s = 1500 \text{ kg.m}^{-3} \text{ et } \sigma_{yy} = 350 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} \quad \text{Gibson \& Ashby}$$

[50]

$$f_{c,0}(\rho) = 93,7 \cdot \rho^{0,97} \quad \text{Wood handbook [51]}$$

$$f_{c,0}(\rho) = 101 \cdot \rho^{1,035} \quad \text{Dinwoodie [52]}$$

$$f_{c,90}(\rho) = K_2(\rho) = 0,0325\rho - 6,5941 \quad \text{Toussaint [30]}$$

- PARTIE 4 - MODELISATION DU MATERIAU BOIS

$$\sigma(\varepsilon_d) = \frac{(K_1 - K_3)\varepsilon_d}{\left\{1 + \left[\frac{(K_1 - K_3)\varepsilon_d}{K_2}\right]^r\right\}^{\frac{1}{\gamma}}} + K_3\varepsilon_d + \exp(\alpha\varepsilon_d^{\gamma}) - 1 \quad \text{Toussaint [30]}$$

Avec

$$\varepsilon_d(\rho) = -9 \times 10^{-4} \rho + 0,7818$$

$$K_1 = 453 \text{ MPa ou } E_{90}(\rho) \text{ MPa}$$

(Cette dernière expression sera préférée car elle permet de tenir compte de l'évolution de la masse volumique contrairement aux observations de Toussaint)

$$K_2(\rho) = 0,0325\rho - 6,5941 \text{ MPa}, \quad K_3(\rho) = 0,03745\rho - 8,2875 \text{ MPa}$$

$$\alpha = 12,25, \quad \gamma = 8,1169, \quad r = 7,42$$

En considérant la masse volumique moyenne de 466 kg/m^3 des essais de compression longitudinale indiquée dans le tableau 16, les différents paramètres permettant d'établir la loi sont évalués :

$$E_{0,mean}(\rho) = 43,722 \times 466 - 7904,33 = 12470 \text{ MPa} \quad \text{EN 338}$$

$$E_{90,mean}(\rho) = 1,4484 \times 466 - 259,81 = 415 \text{ MPa} \quad \text{EN 338 [49]}$$

$$\varepsilon_d(\rho) = -9 \times 10^{-4} \times 466 + 0,7818 = 0,36 \quad \text{Toussaint [30]}$$

$$f_{c,0}(\rho) = 0,34 \times 350 \left(\frac{466}{1500} \right) = 36,96 \text{ MPa} \quad \text{Gibson \& Ashby [50]}$$

$$f_{c,0}(\rho) = 93,7 \times 0,466^{0,97} = 44,67 \text{ MPa} \quad \text{Wood handbook [51]}$$

$$f_{c,0}(\rho) = 101 \times 0,466^{0,35} = 45,82 \text{ MPa} \quad \text{Dinwoodie [52]}$$

La résistance moyenne des essais de compression longitudinale avec une masse volumique moyenne de 466 kg/m^3 s'est élevée à $46,3 \text{ MPa}$. Ceci donne un écart de 20% avec l'estimation de Gibson & Ashby, 3,5% avec celle du Wood HandBook et 1% avec celle de Dinwoodie : en l'absence d'essais supplémentaires, cette dernière estimation sera retenue pour établir les lois de comportements nécessaires dans la suite de ce travail.

$$f_{c,90}(\rho) = K_2(\rho) = 0,0325 \times 466 - 6,5941 = 8,55 \text{ MPa}$$

$$f_{c,parallel}(\rho) = 45,82 - \frac{45,82}{12470} \times 415 = 44,3 \text{ MPa}$$

$$E_{parallel}(\rho) = \frac{44,3}{45,82} \times 12056 \text{ MPa} \quad E_{dichotomique}(\rho) = -415 \text{ MPa}$$

Avec :

- PARTIE 4 - MODELISATION DU MATERIAU BOIS

$$K_1 = E_{90,mean} = 415 \text{ MPa}$$

$$K_2(466) = 0,0325 \times 466 - 6,5941 = 8,55 \text{ MPa}$$

$$K_3(466) = 0,03745 \times 466 - 8,2875 = 9,16 \text{ MPa}$$

$$\alpha = 12,25, \gamma = 8,1169, r = 7,42$$

$$\sigma(\varepsilon_d = 0,36) = \frac{(415 - 9,16) \times 0,36}{\left\{ 1 + \left[\frac{(415 - 9,16)\varepsilon}{8,55} \right]^{7,42} \right\}^{7,42}} + 9,16 \times 0,36 + \exp(12,25\varepsilon^{8,1169 \times 0,36}) - 1$$

$$\sigma(\varepsilon_d = 0,36) = 12,70 \text{ MPa}$$

$$E_{déchusse,2}(\rho) = \frac{45,82 - 44,3 + 415 \cdot \left(\frac{8,55}{415} - \frac{44,3}{12056} \right) - 12,70}{0,36 - \frac{8,55}{415}} = -12,30 \text{ MPa}$$

Le tableau 17 présente alors les valeurs essentielles à retenir pour décrire un bois d'épicéa avec le modèle structural.

Tableau 17 : Valeurs remarquables du modèle structural d'un bois d'épicéa de masse volumique 466 kg/m³

$\rho_{12\%}$ Kg/m ³	$f_{c,0}$ MPa	$f_{c,90}$ MPa	$f_{c,poutres}$ MPa	E_0 MPa	E_{90} MPa	$E_{poutres}$ MPa	$E_{déchusse,1}$ MPa	$E_{déchusse,2}$ MPa
466	45,82	8,55	44,3	12470	415	12054	-415	-12,3

6.2. Réponse du modèle sous contraintes normales

Pour compléter l'identification du modèle structural, il est nécessaire de préciser certains paramètres de comportement du modèle Crushable Foam tel qu'un coefficient de Poisson ν et de deux paramètres k et k_t . Dans la modélisation élastique homogène du bois, il est nécessaire de définir trois coefficients de Poisson, deux sont généralement très faibles (ν_{RL} et ν_{TL}) et un, légèrement plus élevé (ν_{RT}). Ne souhaitant pas intégrer un quelconque effet de ce type à ce stade de la modélisation dans le schéma représentatif élémentaire, la valeur retenue est très faible. Toussaint [30] avait retenu dans ses applications une valeur également très faible sans en observer l'effet. Le paramètre k est égal au rapport de la résistance en compression uniaxiale de la mousse sur la résistance en compression hydrostatique de celle-ci. La difficulté de réalisation d'essai de compression hydrostatique sur le bois conduit à retenir raisonnablement une valeur de 1 pour ce paramètre. Avec la loi de comportement en compression transversale uniaxiale du bois d'épicéa introduite dans le modèle, il est constaté que ce paramètre affecte de manière très peu sensible les résultats. Enfin le paramètre k_t permet de fixer la résistance en traction uniaxiale de la mousse. En fixant

- PARTIE 4 - MODELISATION DU MATERIAU BOIS

une valeur de 0,5, une résistance en traction transversale de 5,34 MPa est obtenue, ce qui semble raisonnable pour du bois résineux sans défaut.

La figure 89 et la figure 90 présentent les lois de comportement obtenues sur la modélisation d'un cube sollicité uniquement en contrainte uniaxiale par un déplacement imposé à la face concernée. Pour la compression dans le sens du fil, la loi paramétrique ainsi que la loi moyenne des essais réalisés sont également présentées afin d'apprécier la différence. Uniquement après la phase de densification, les comportements divergent. La rigidification dans la phase de sollicitation de la matière ligneuse est plus marquée sur les essais réalisés. Dans le sens transversal, la loi paramétrique de Toussaint [30] est tracée, une légère divergence apparaît dans la phase de sollicitations de la matière ligneuse.

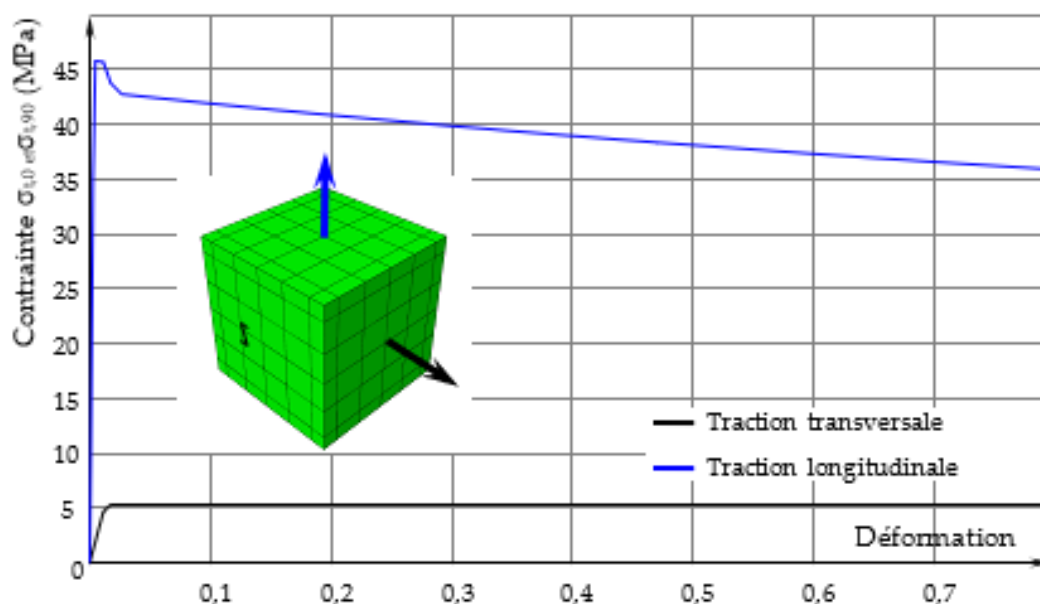


Figure 89 : Loi de comportement du bois en traction longitudinale et transversale obtenue par Abaqus.

- PARTIE 4 - MODELISATION DU MATERIAU BOIS

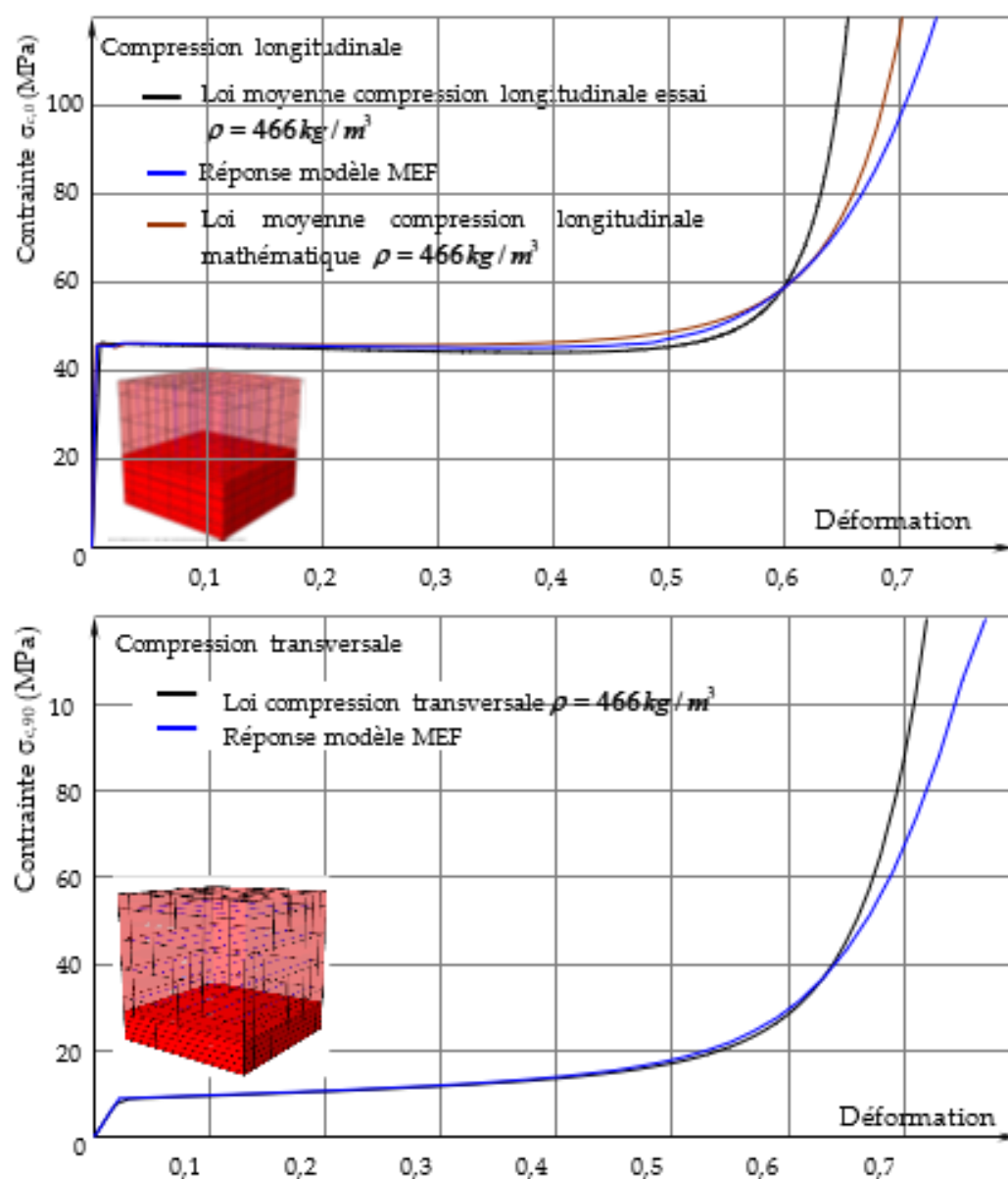
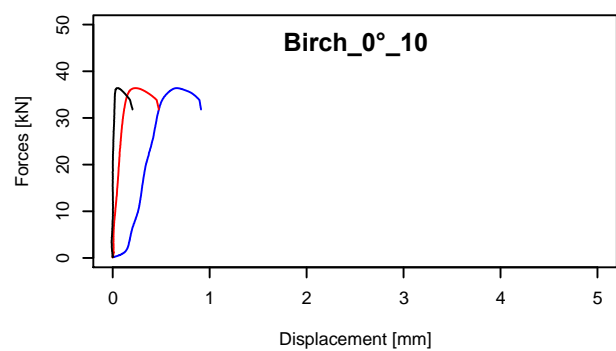
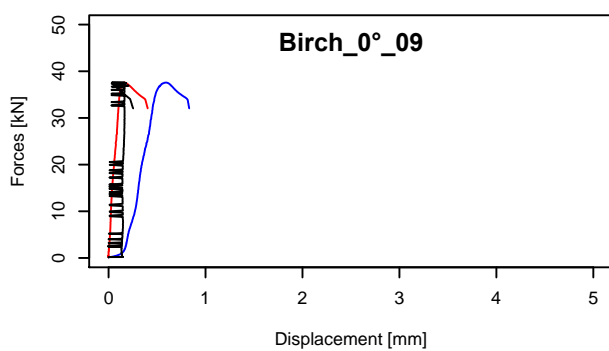
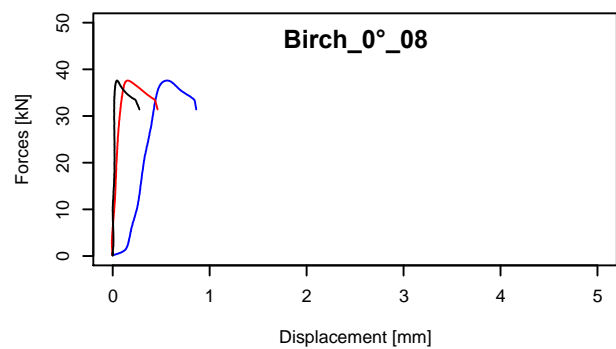
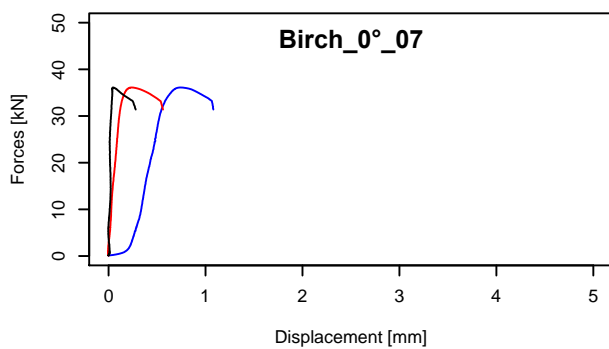
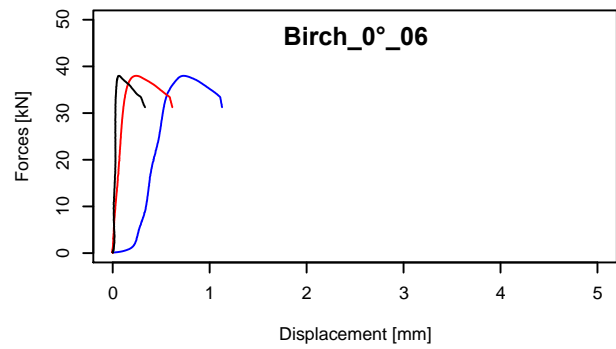
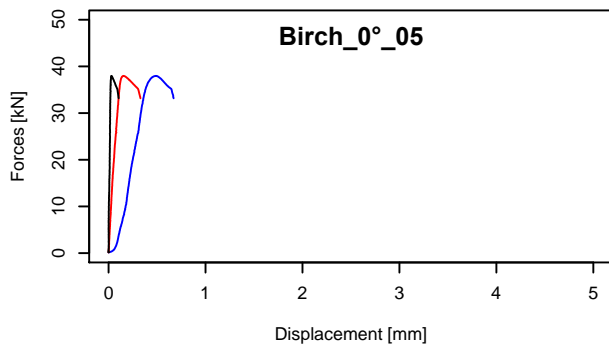
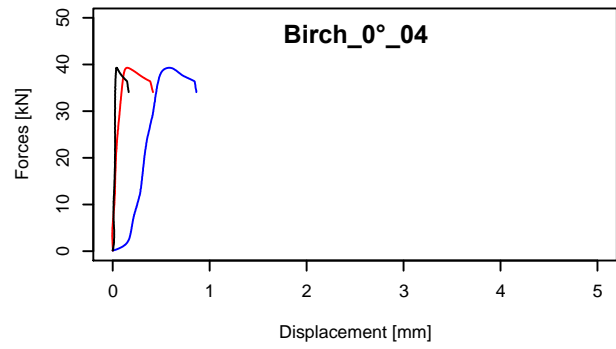
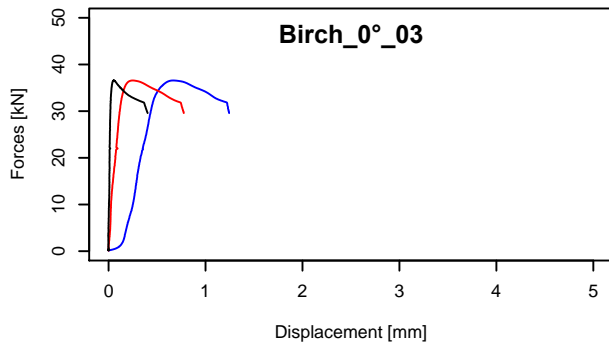
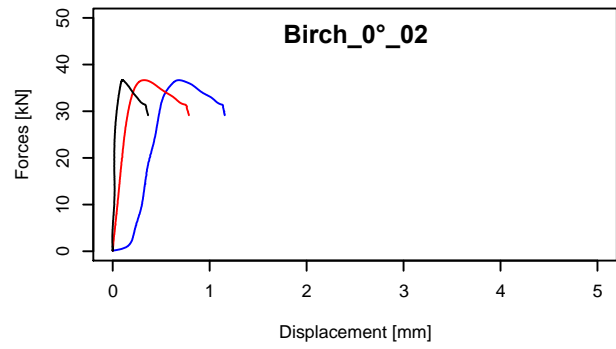
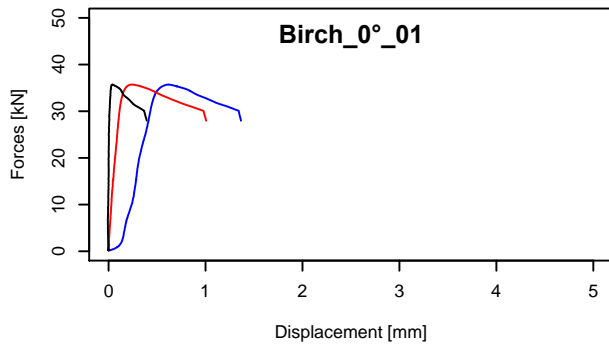
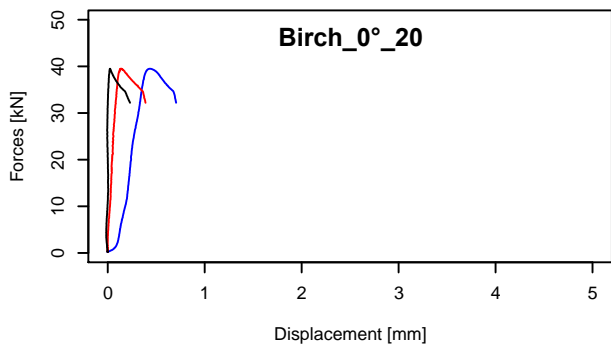
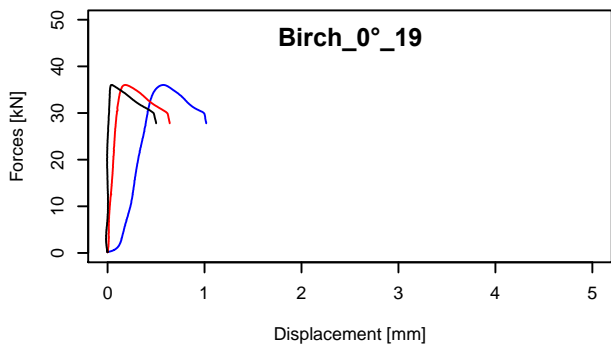
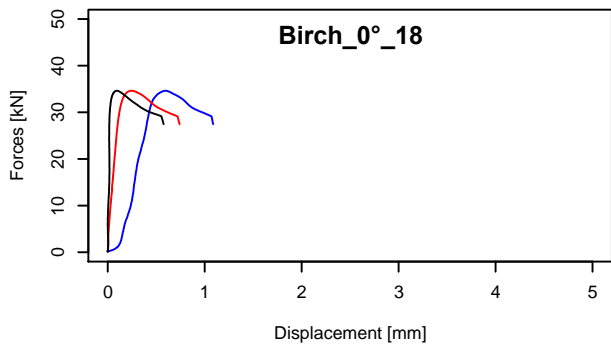
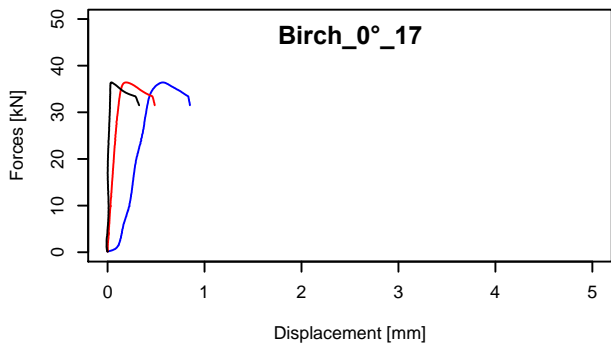
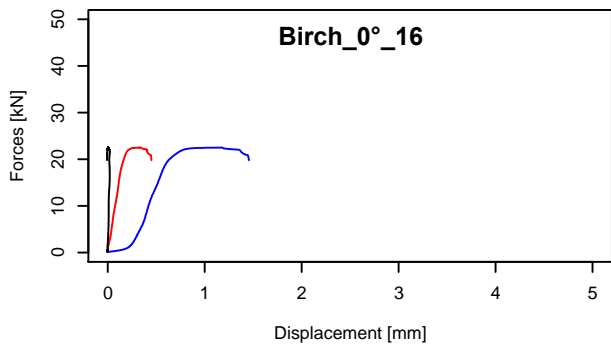
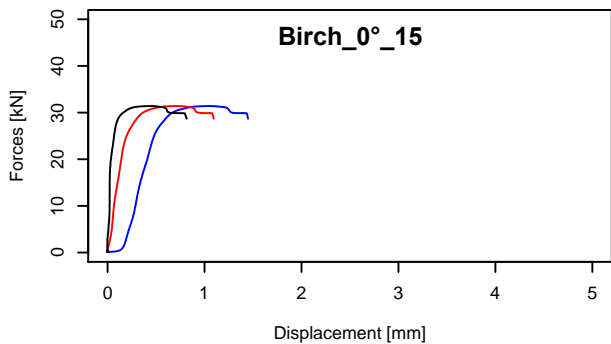
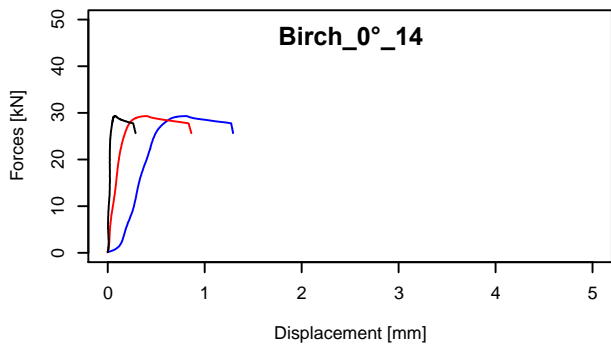
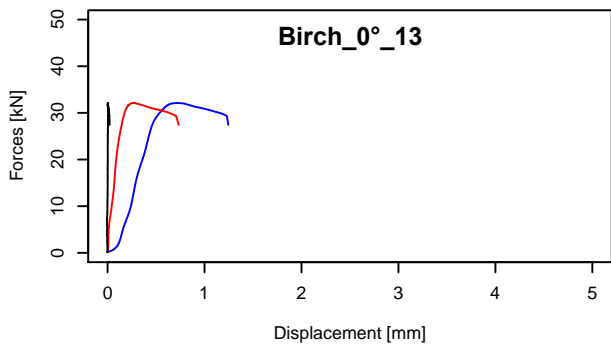
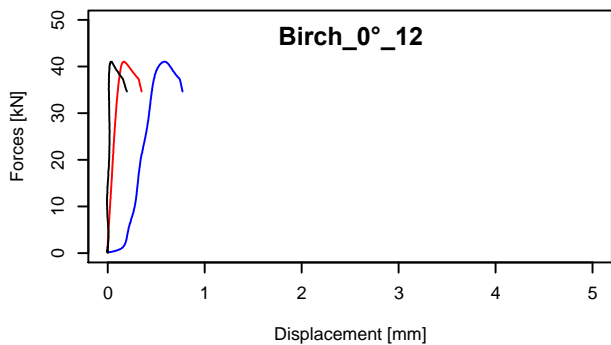
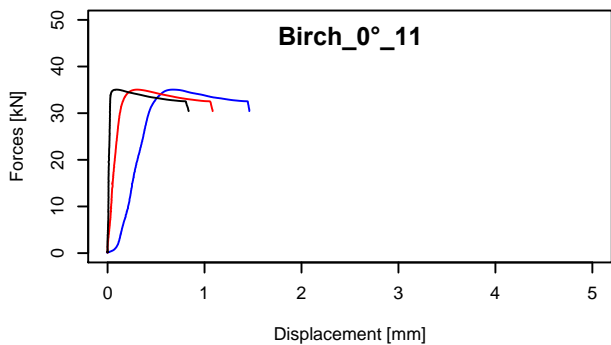
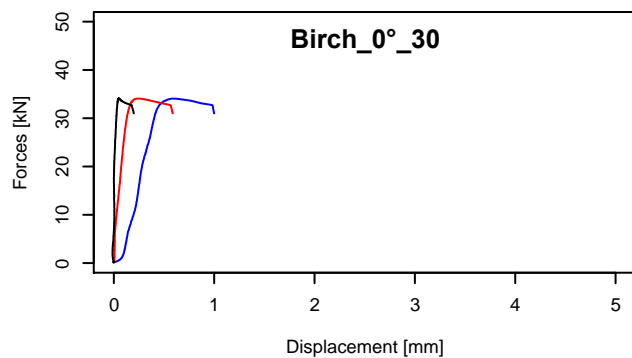
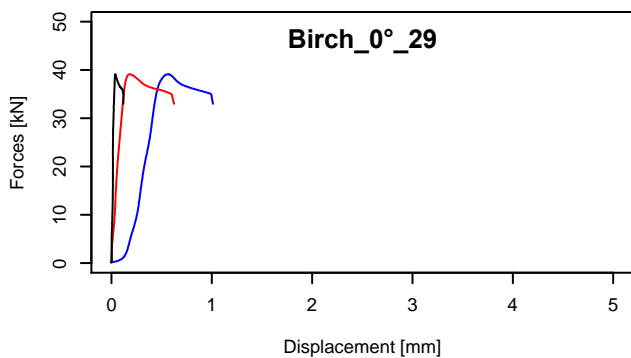
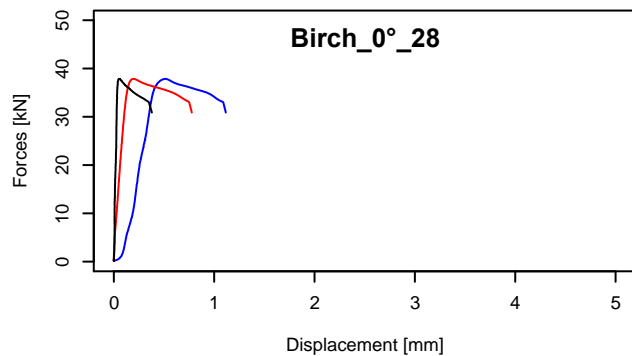
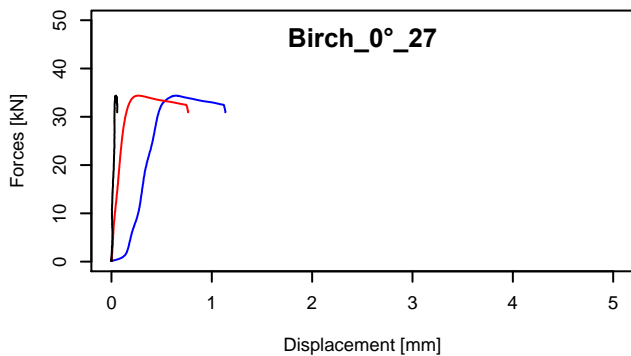
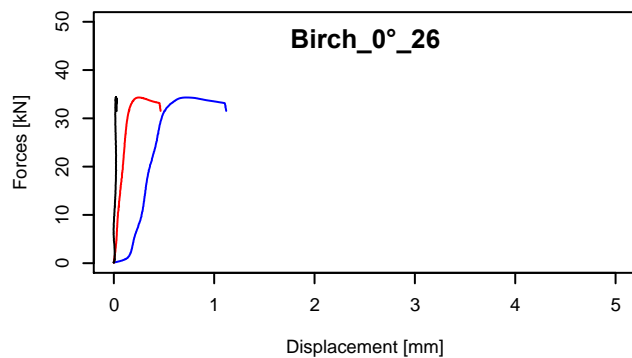
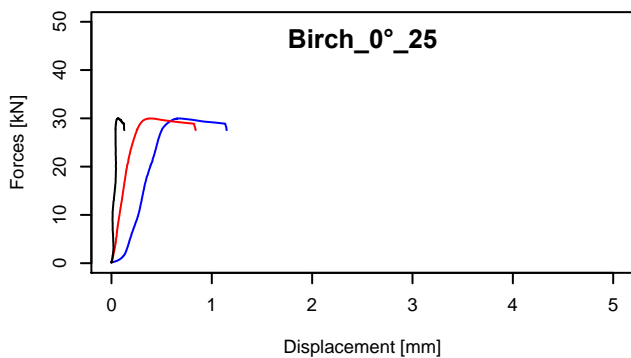
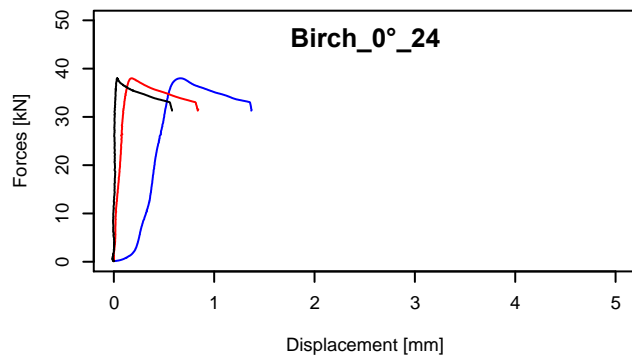
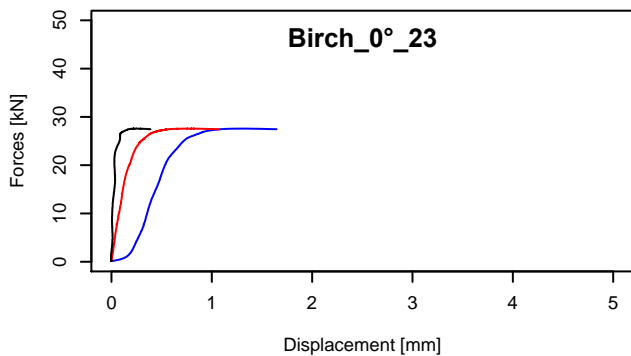
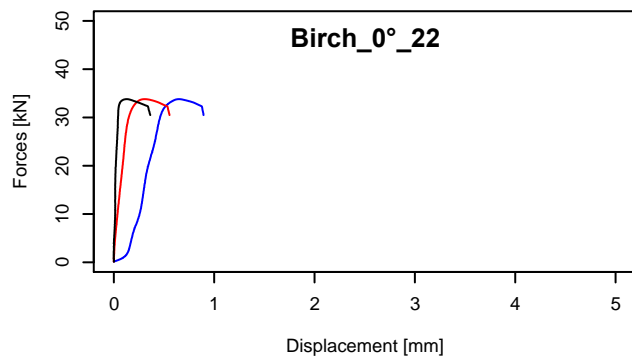
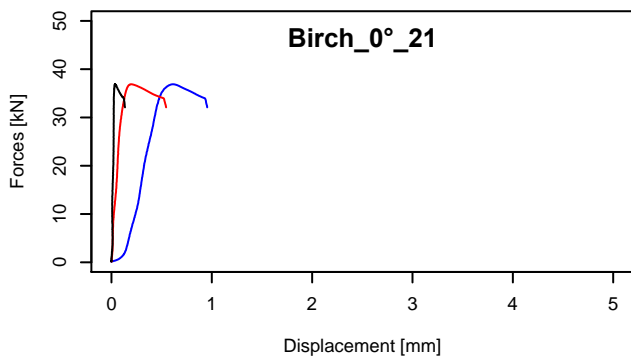


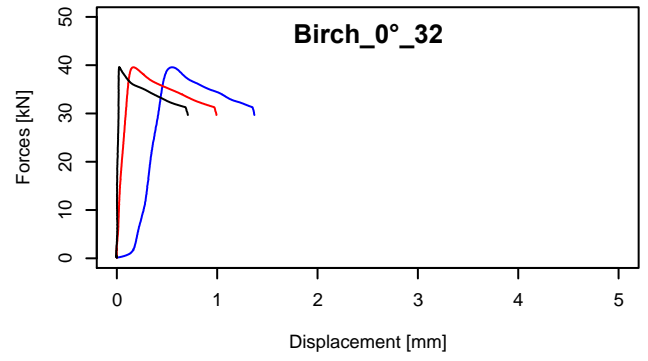
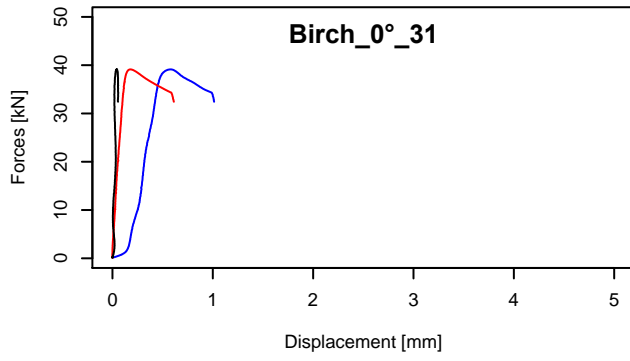
Figure 90 : Évolutions des lois de comportement moyennes expérimentales en compression longitudinale et par la fonction de Toussaint[30] en compression transversale comparées aux réponses de la modélisation.

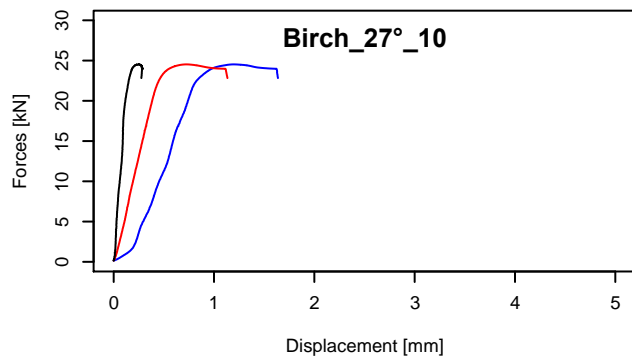
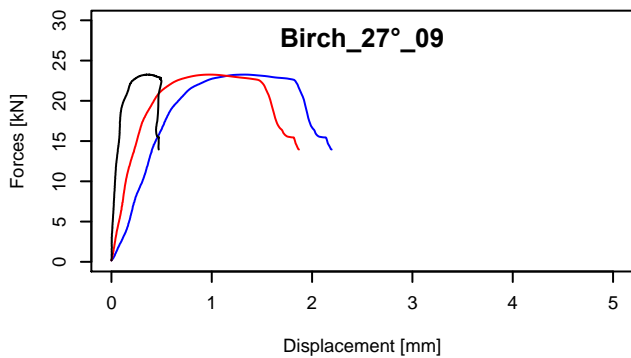
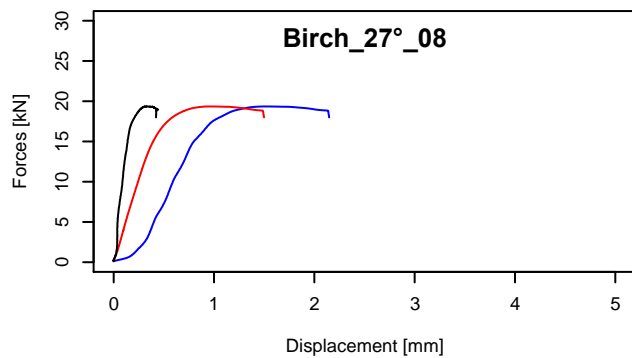
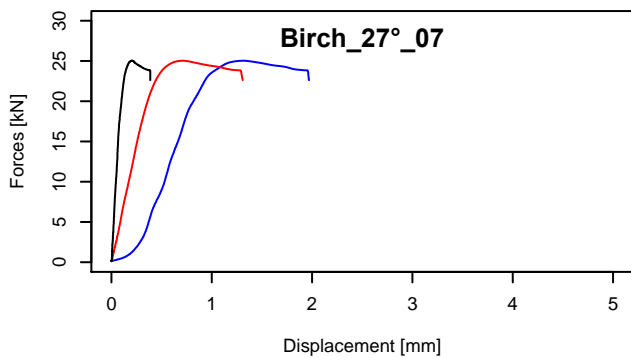
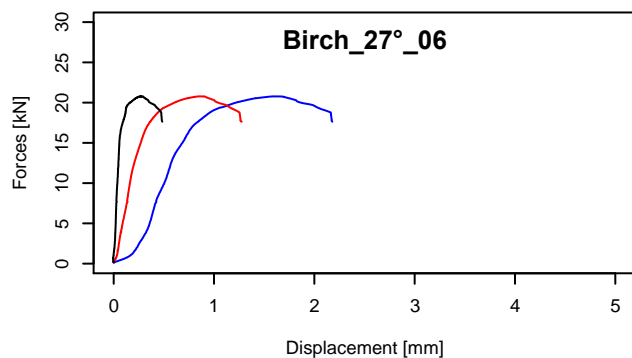
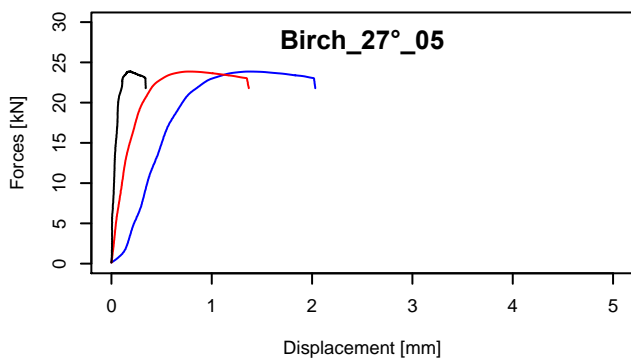
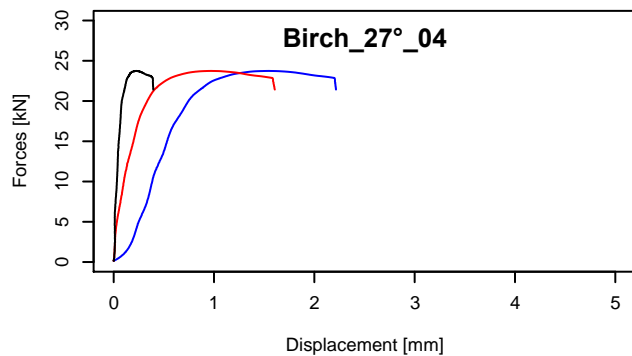
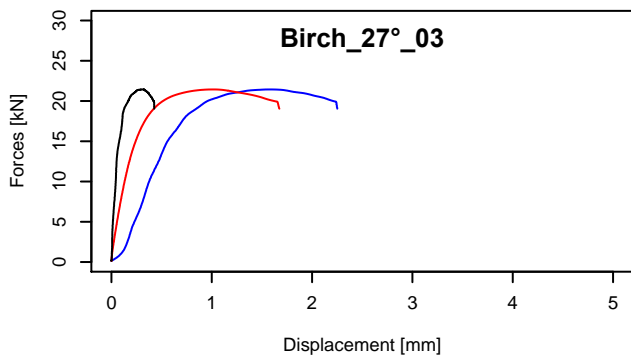
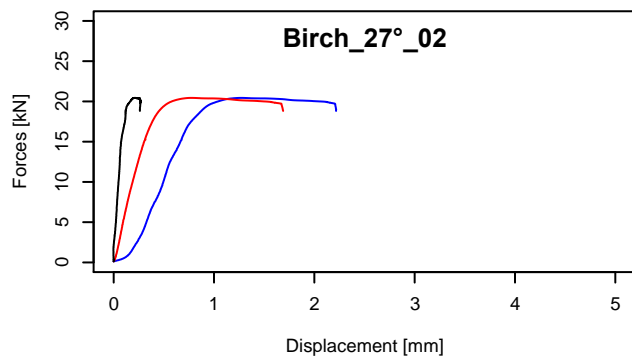
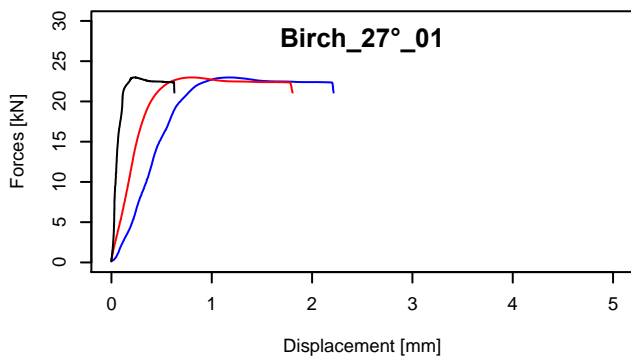
Annexe B - Courbes expérimentales

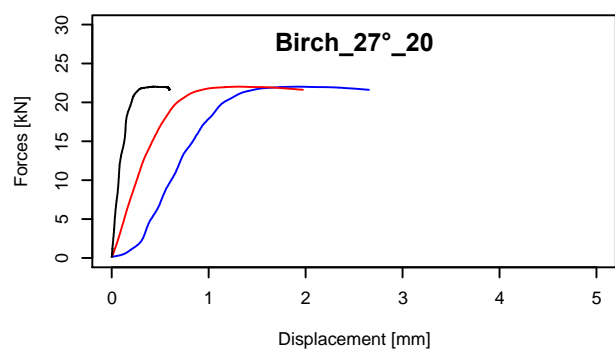
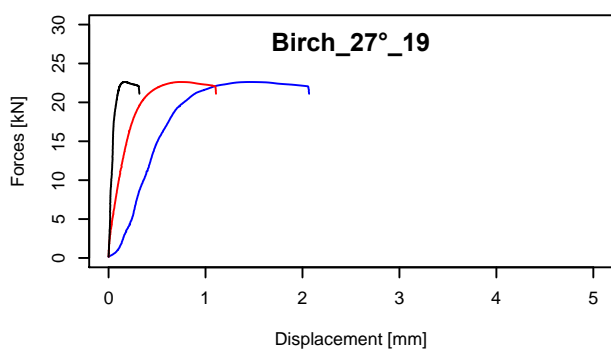
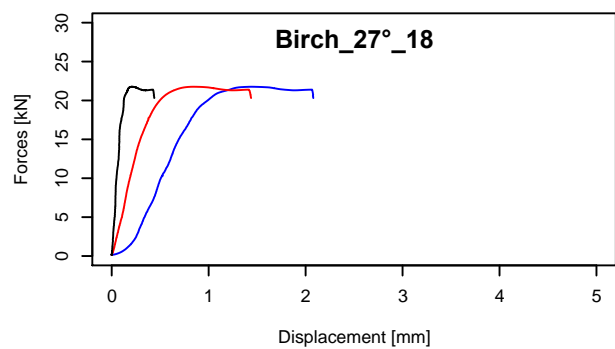
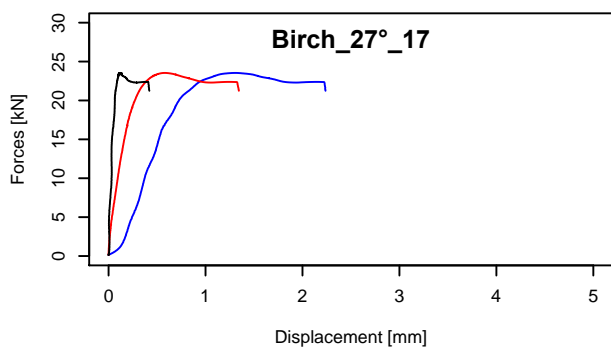
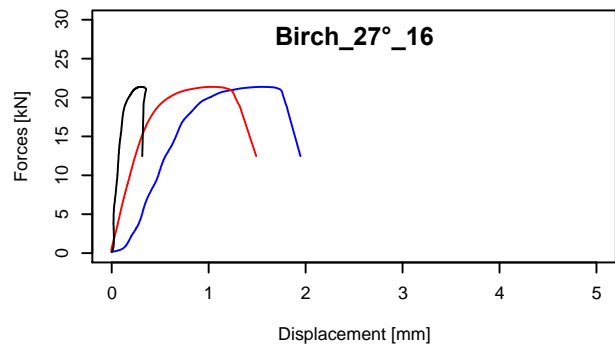
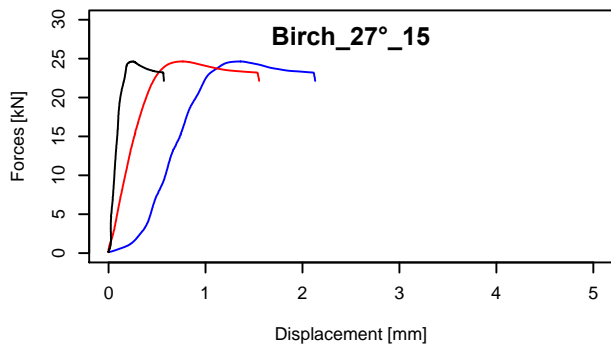
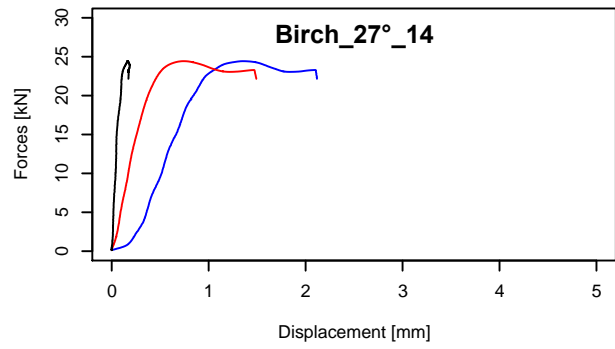
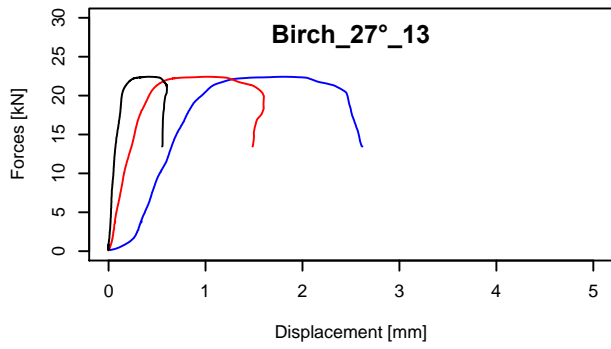
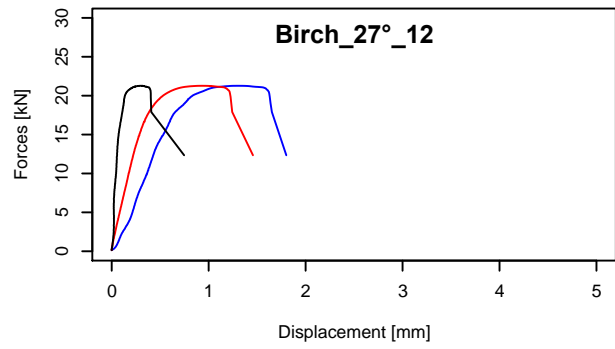
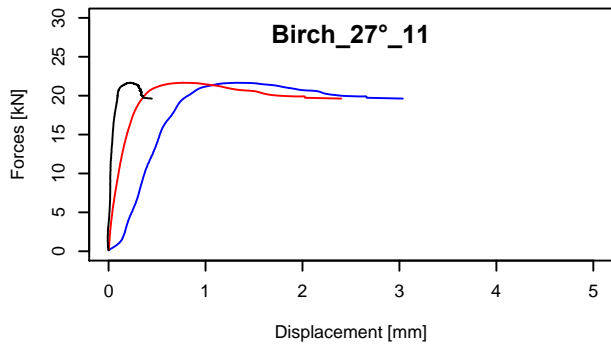


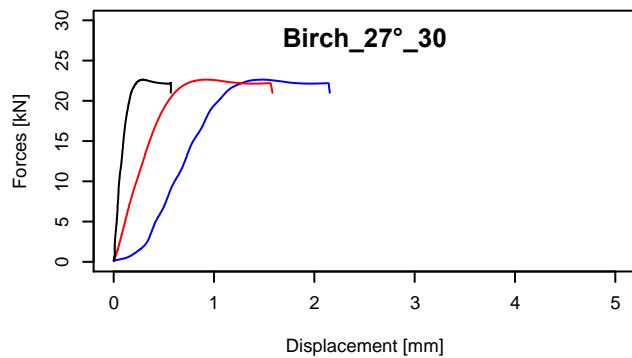
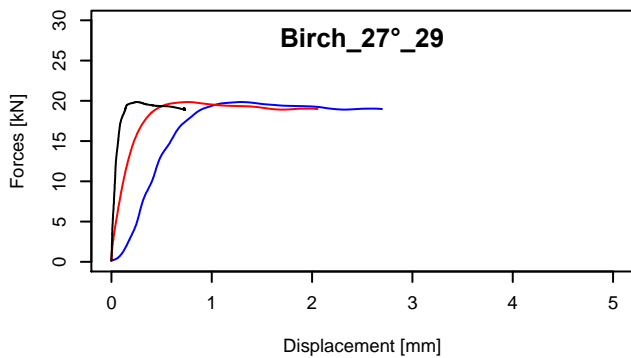
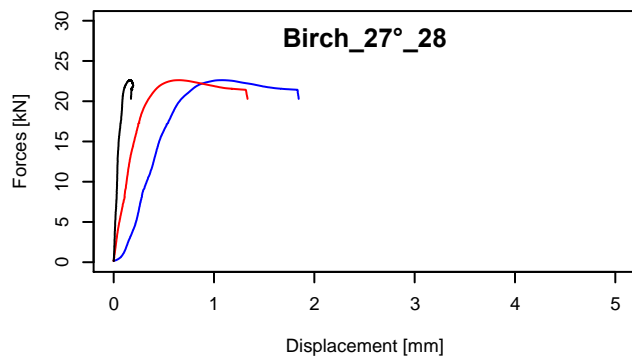
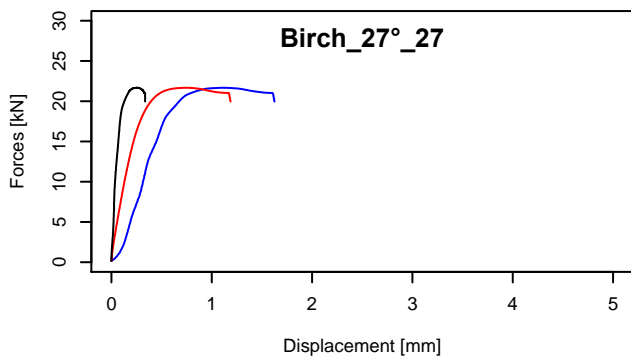
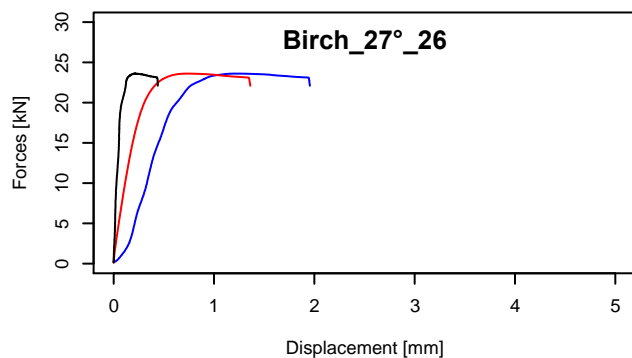
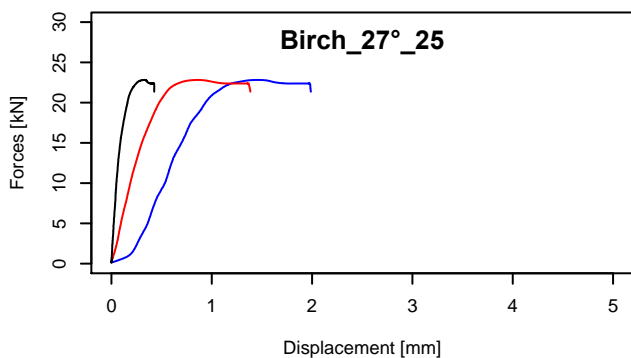
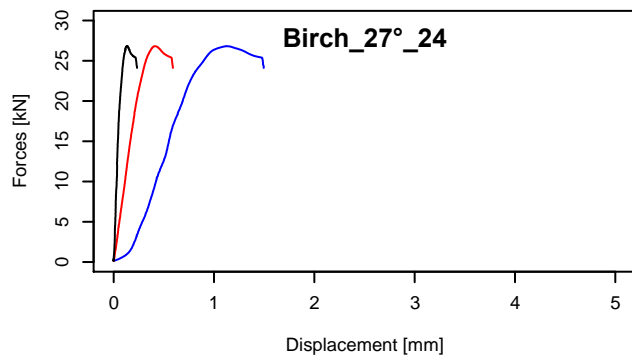
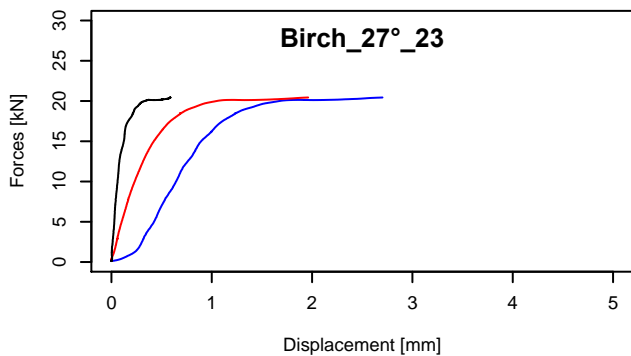
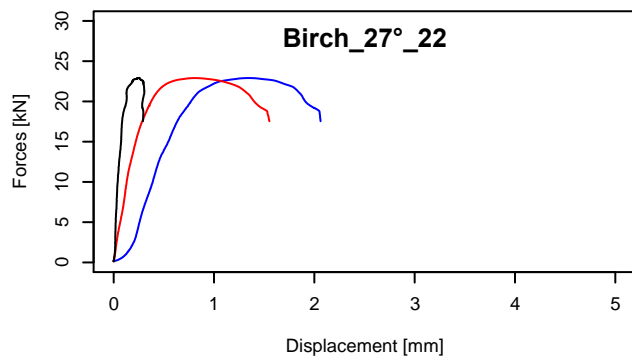
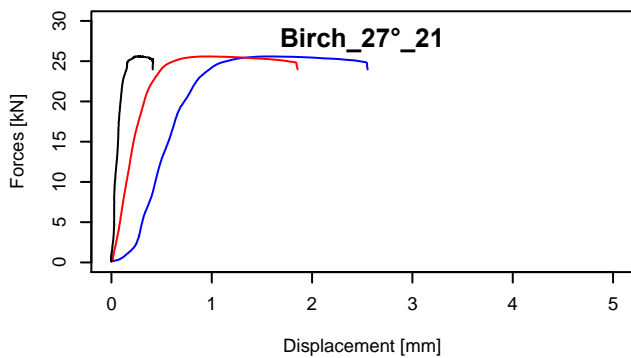


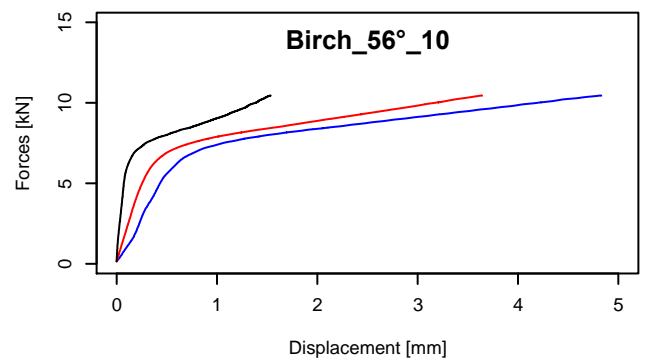
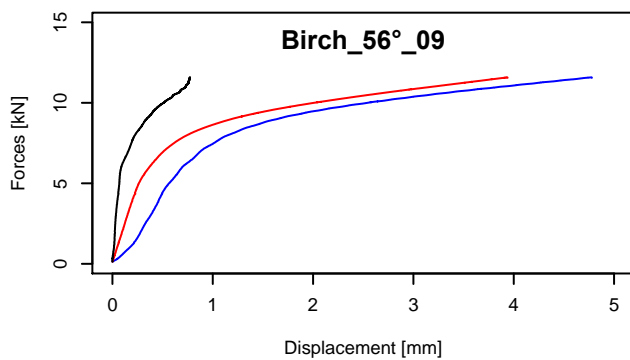
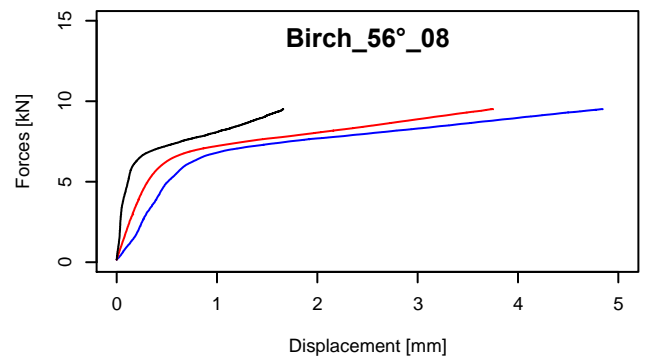
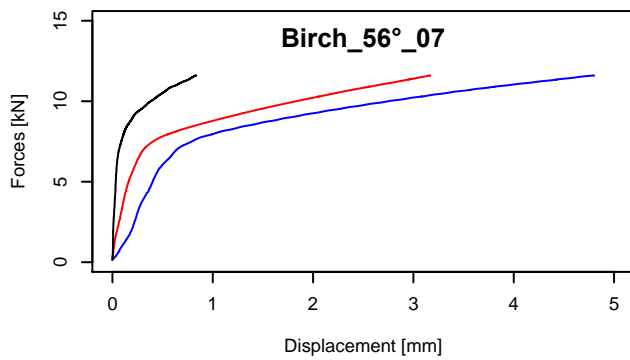
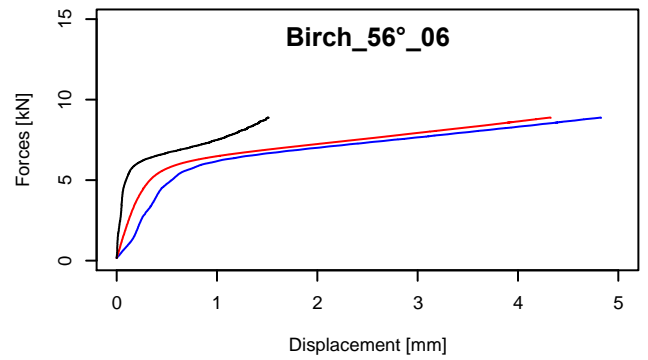
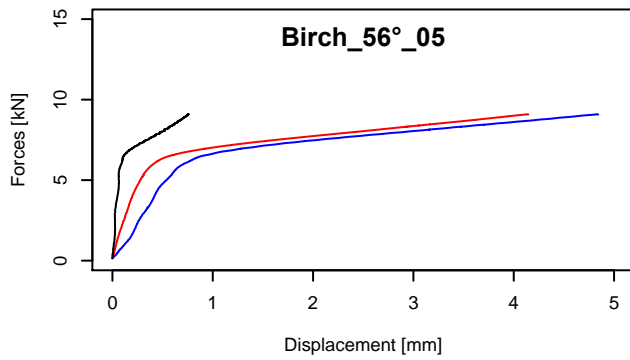
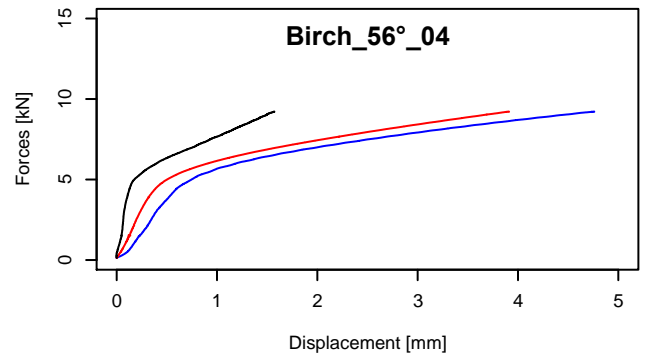
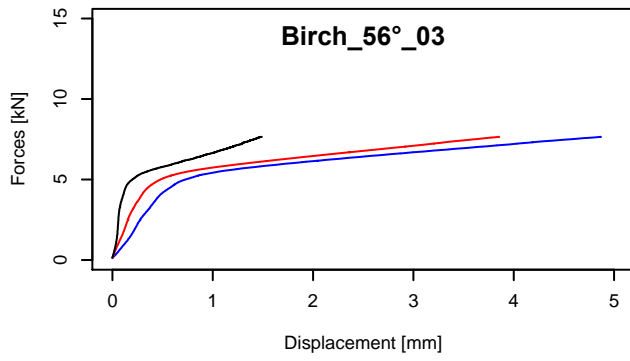
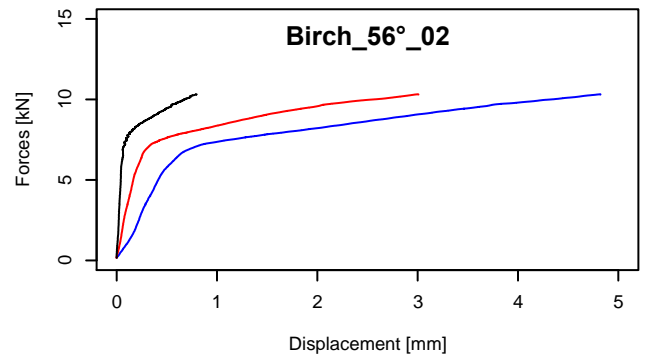
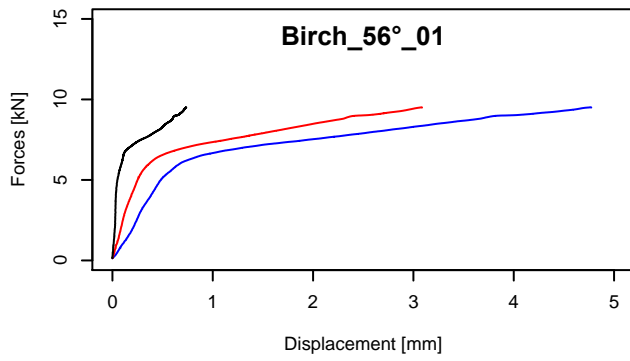


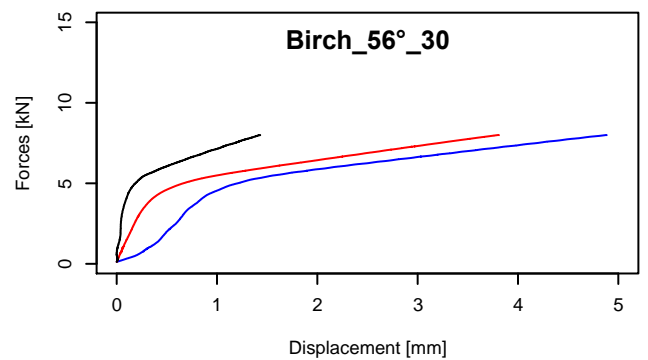
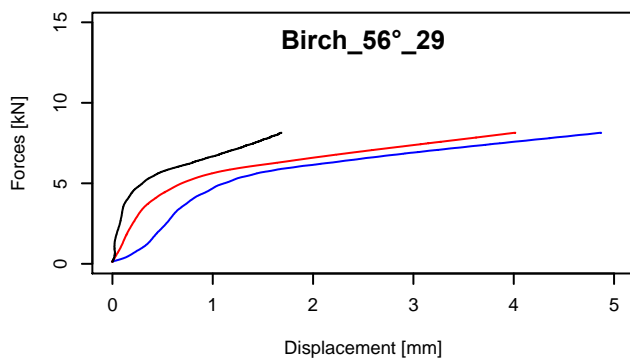
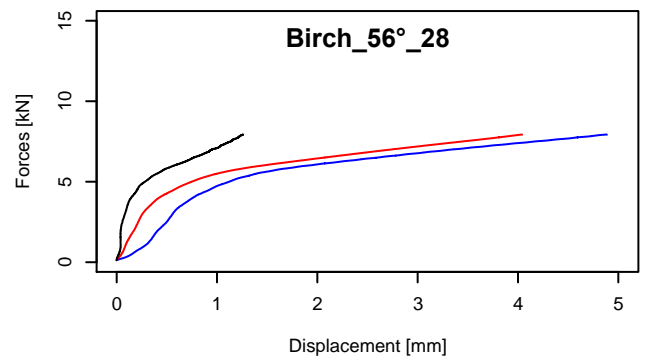
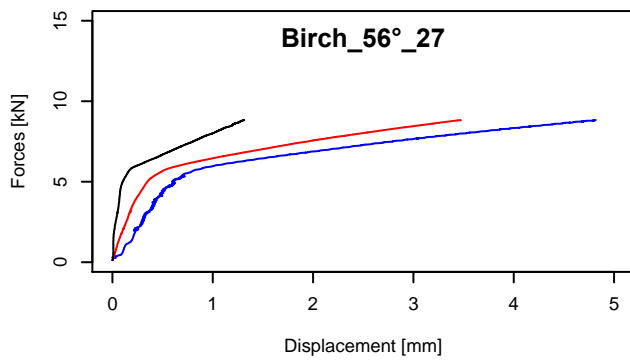
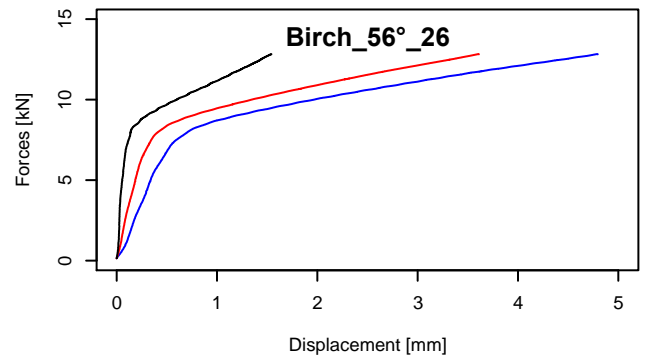
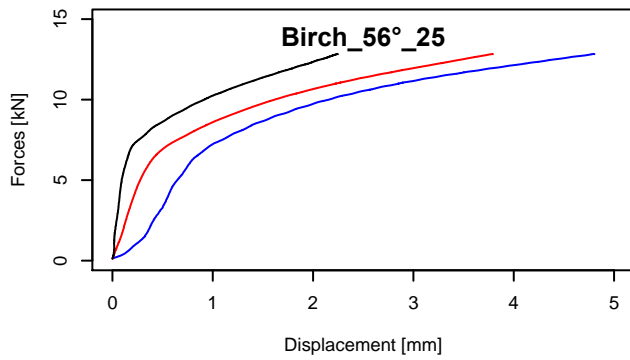
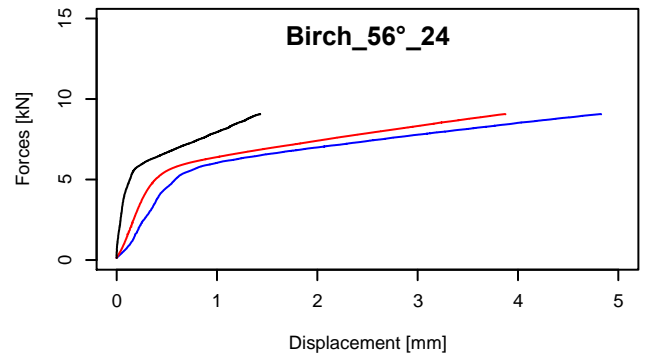
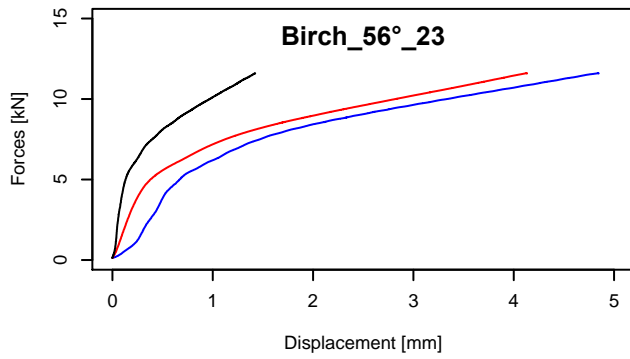
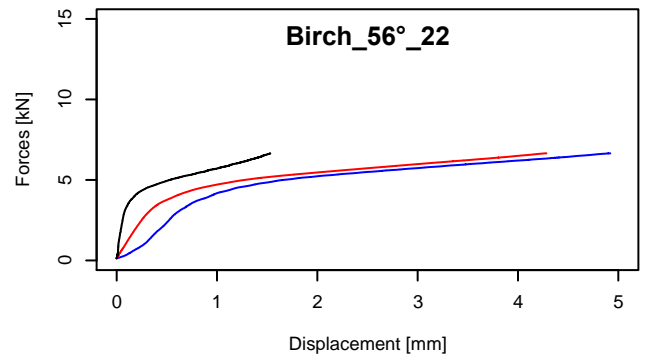
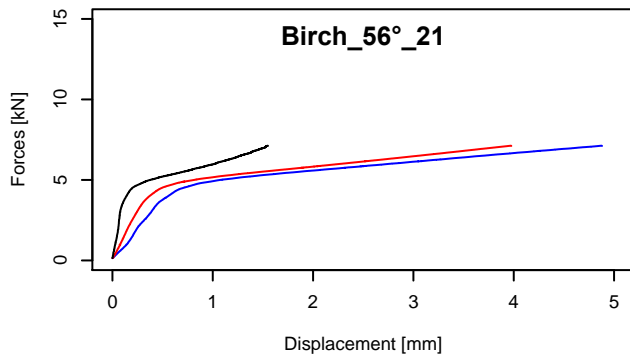


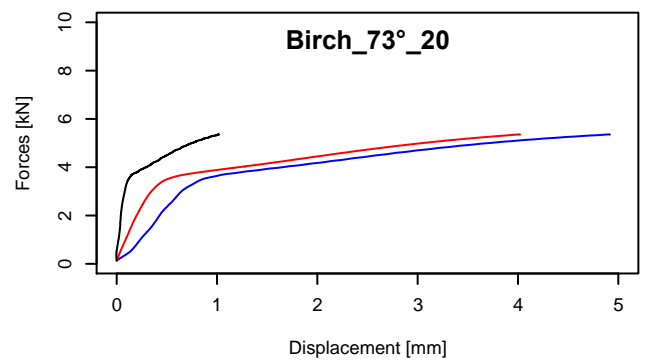
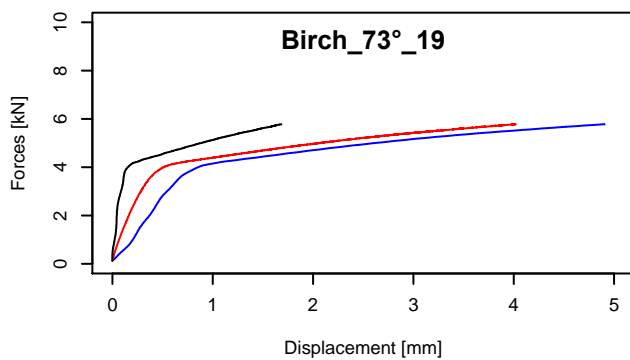
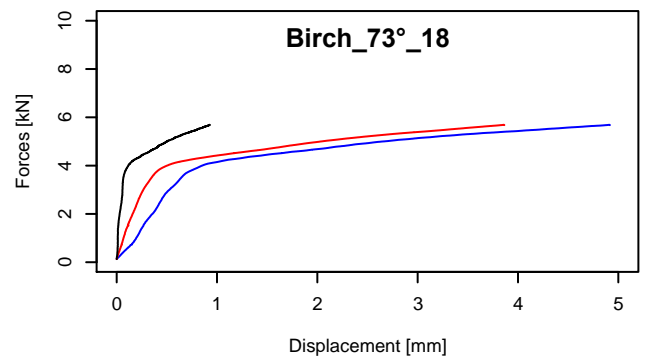
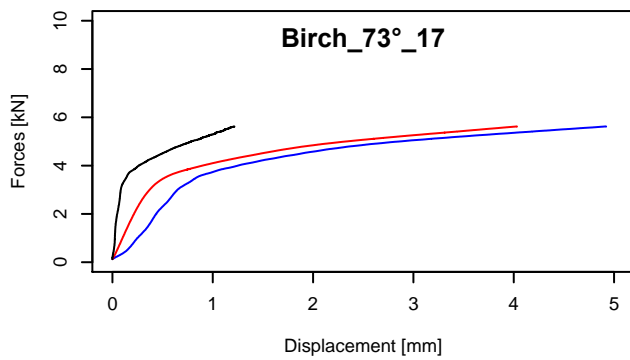
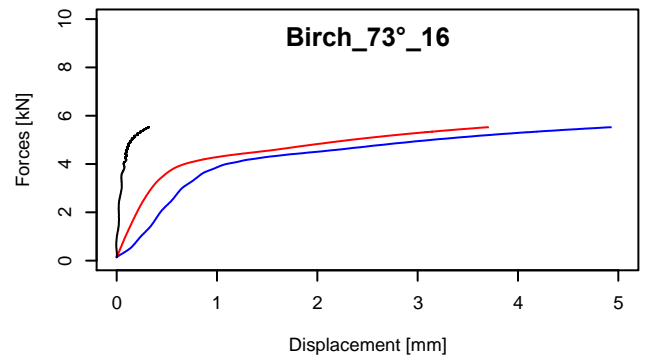
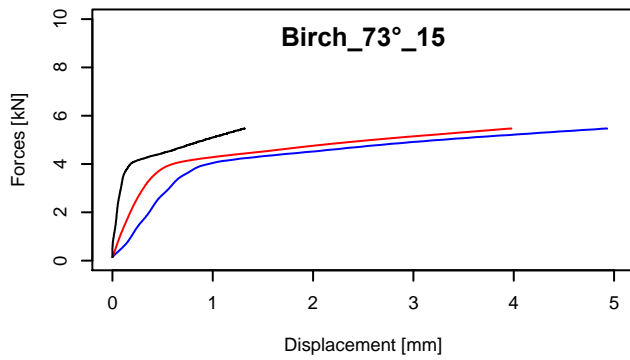
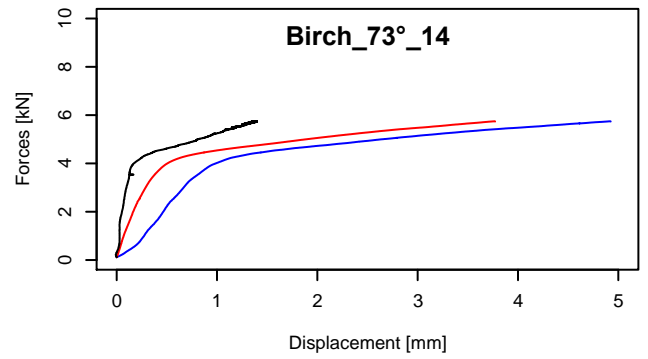
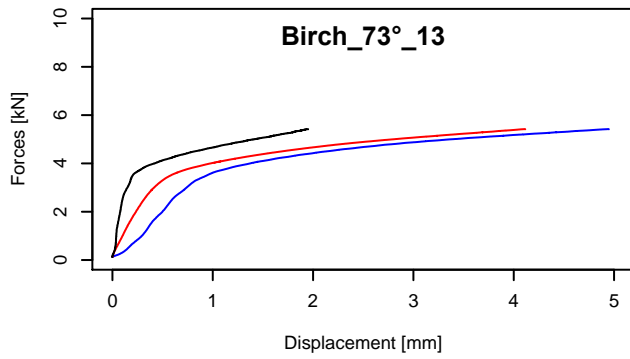
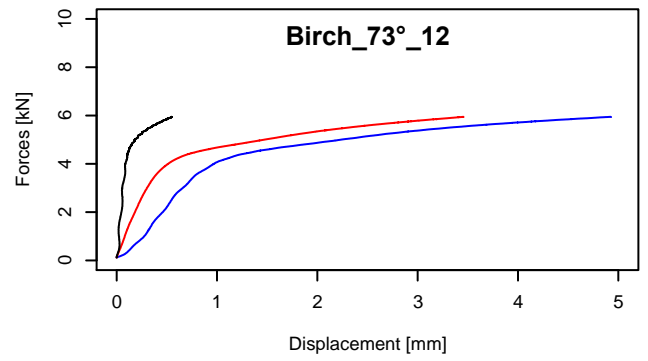
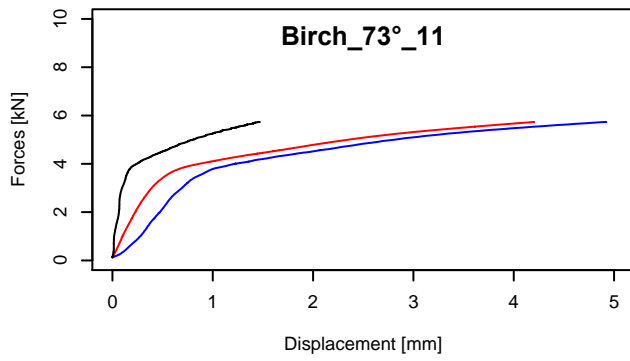


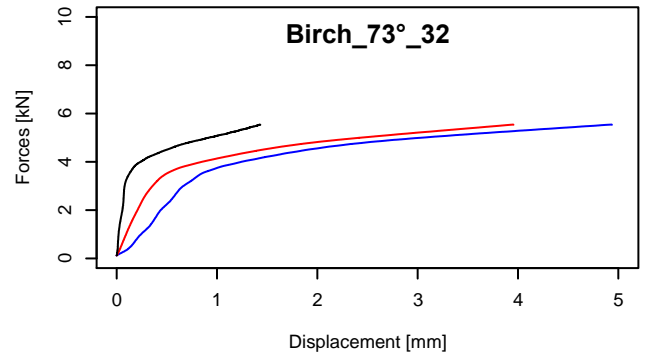
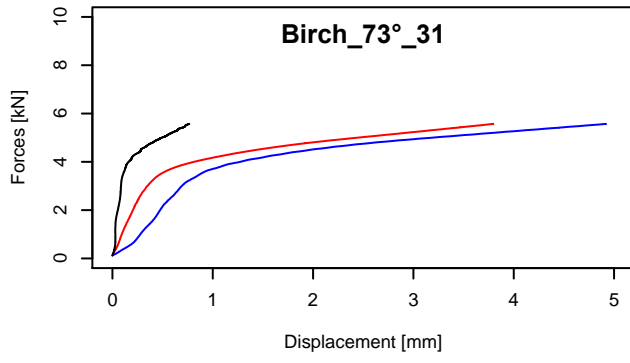


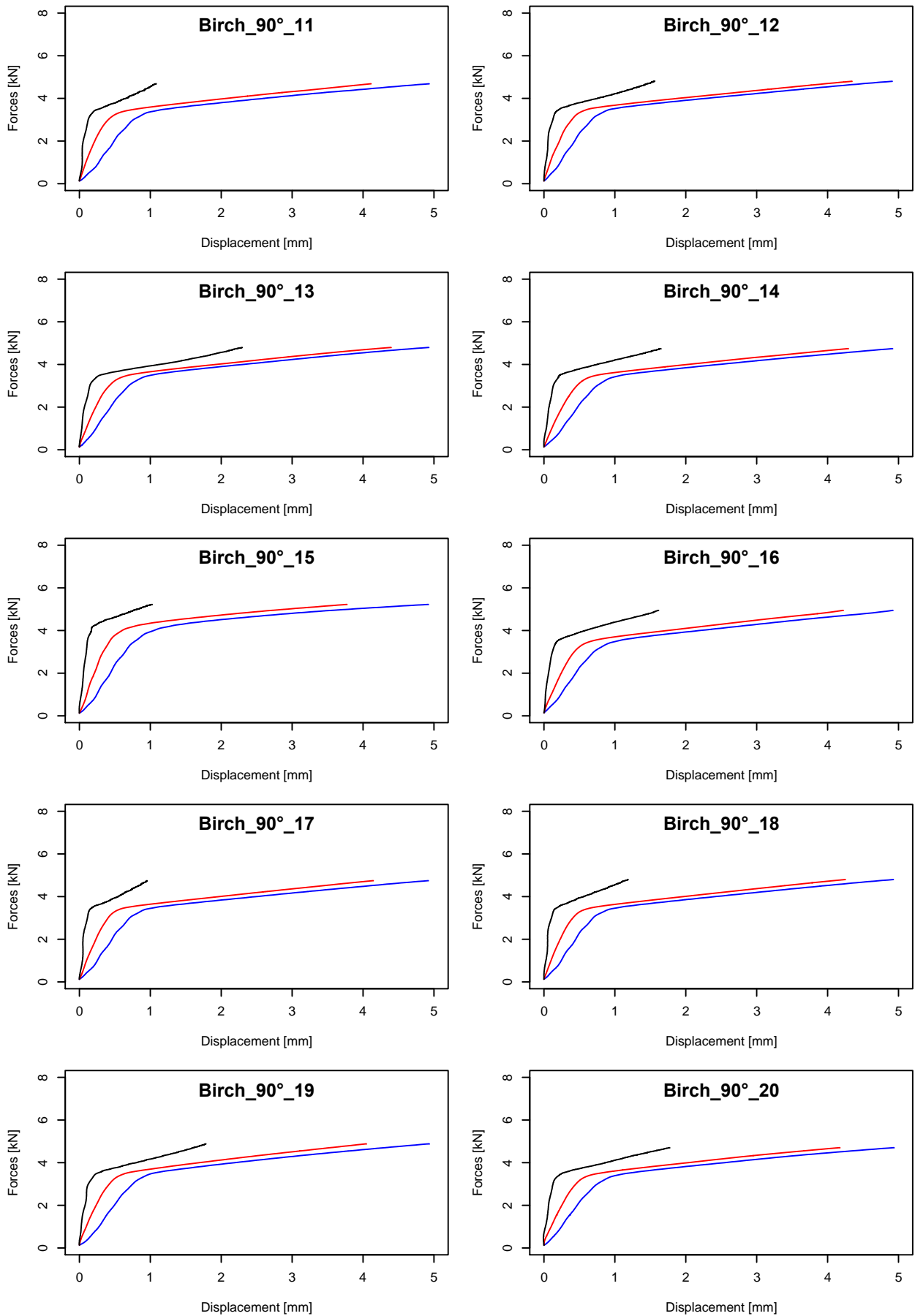


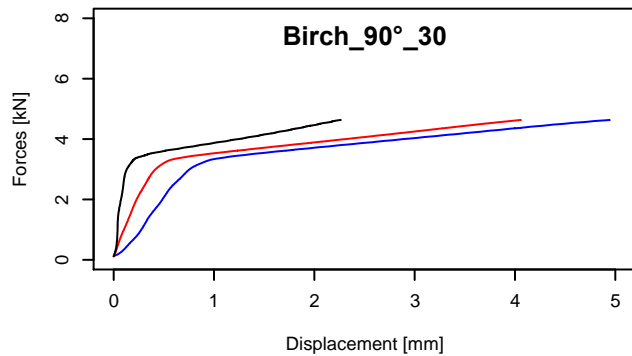
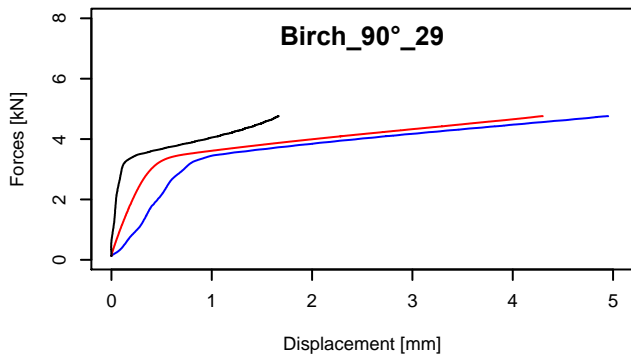
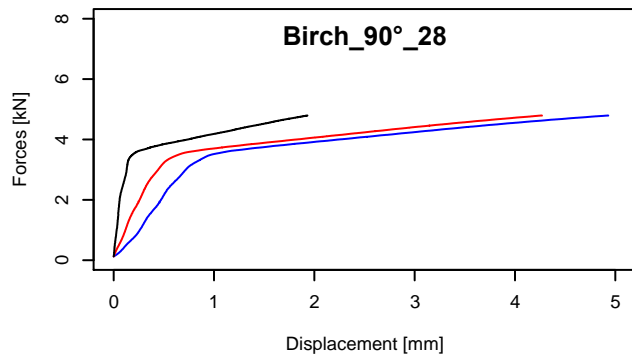
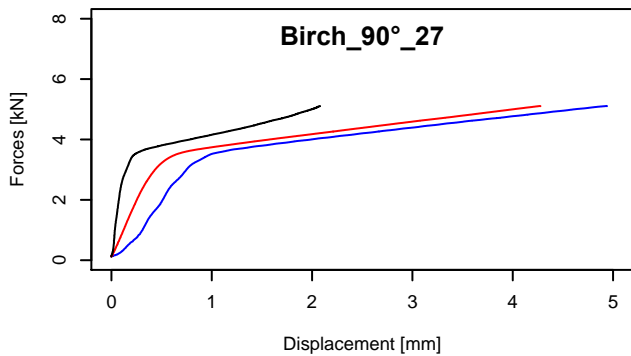
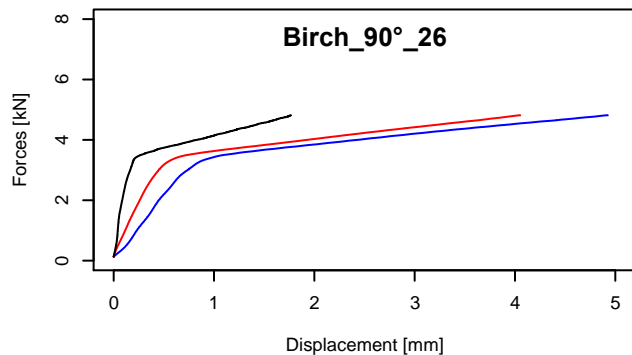
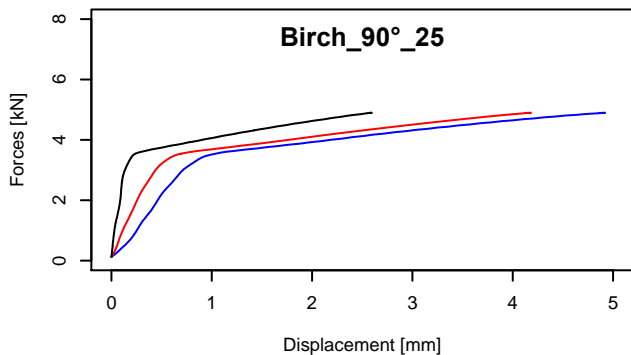
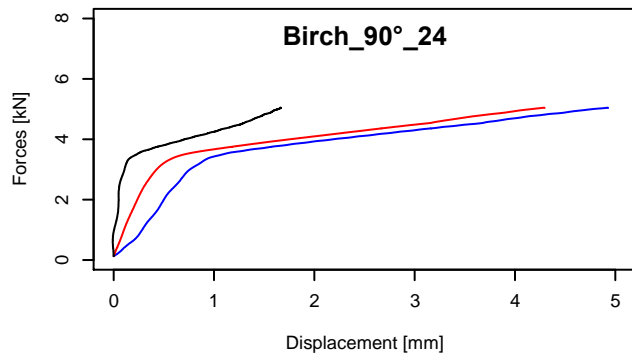
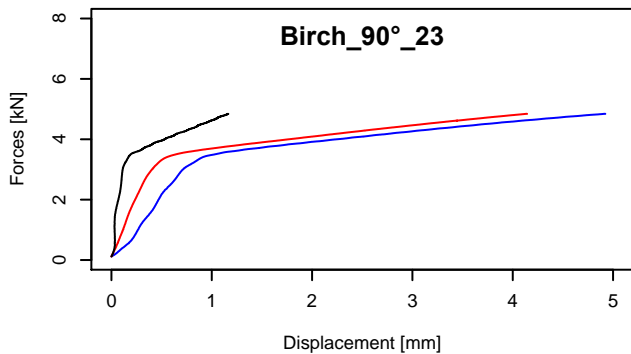
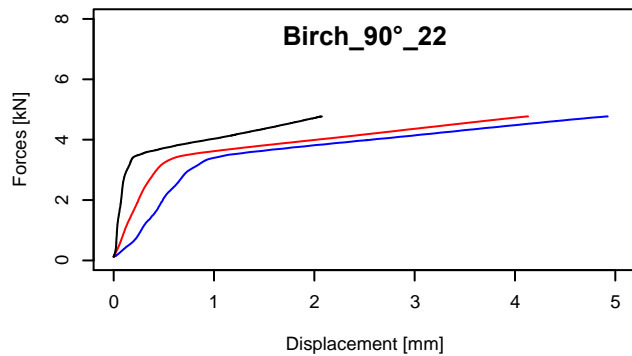
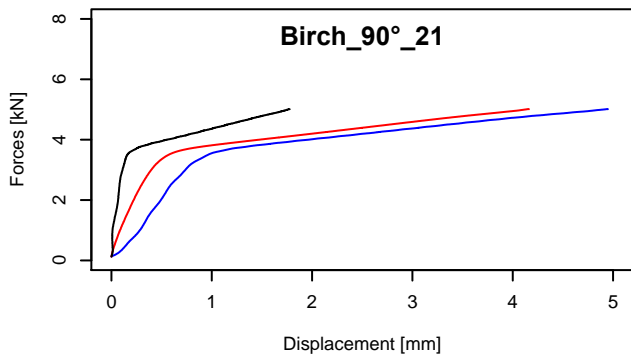


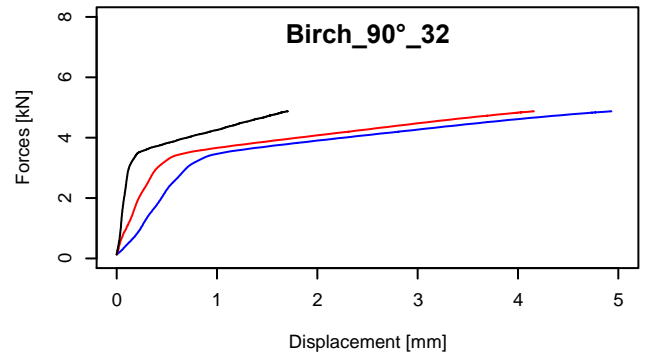
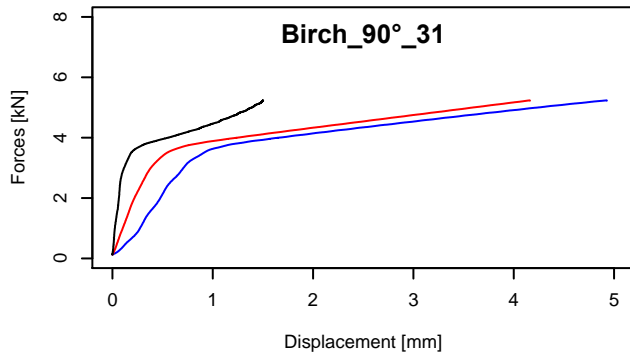


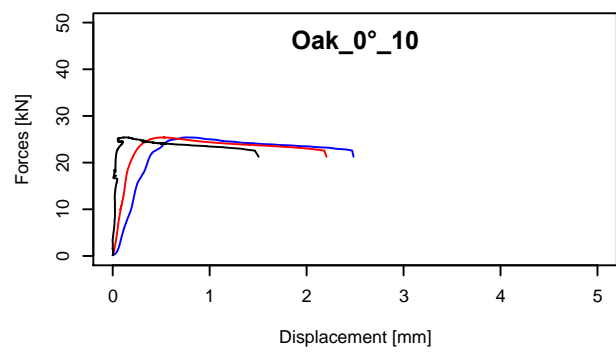
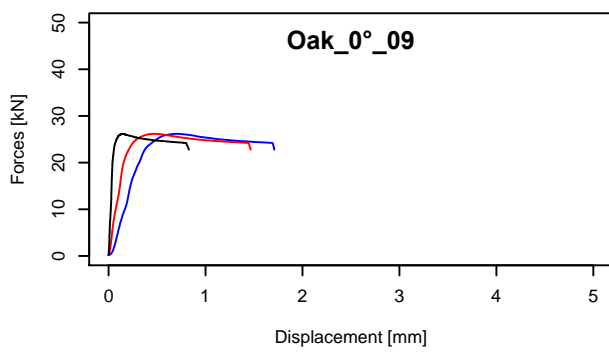
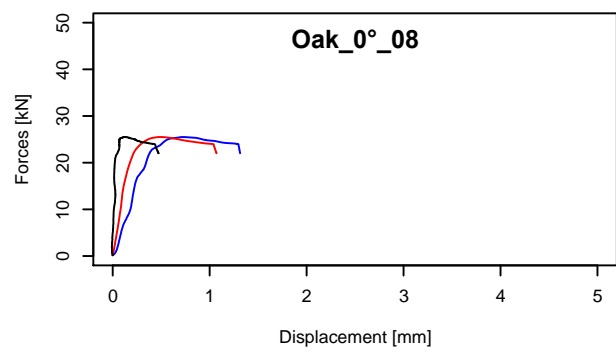
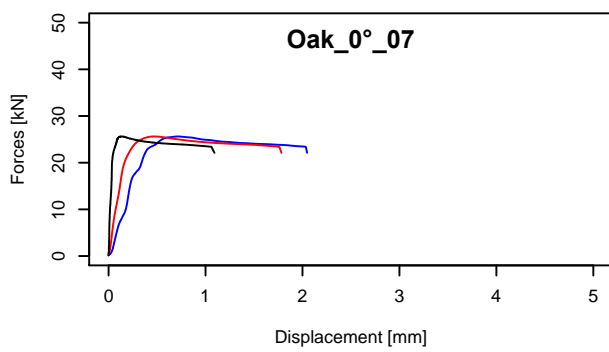
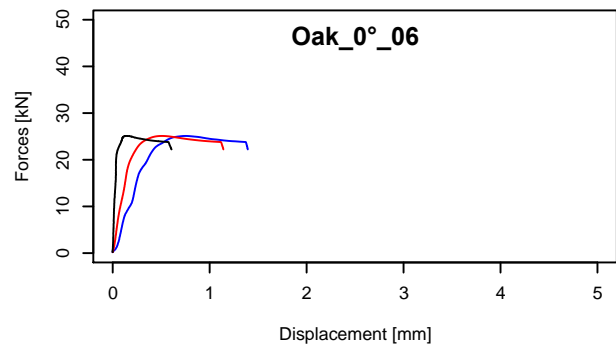
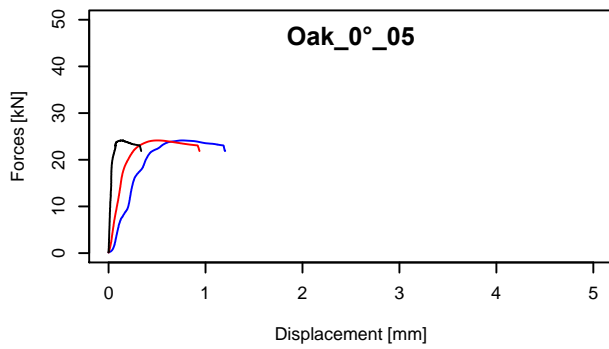
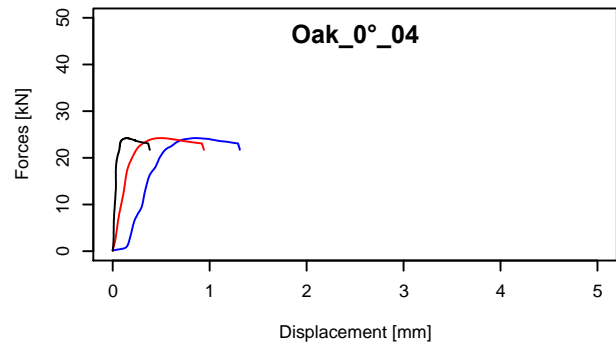
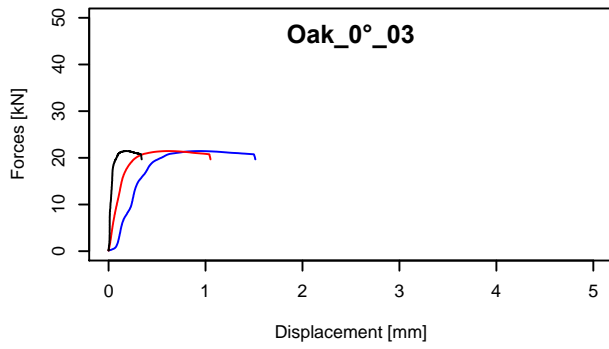
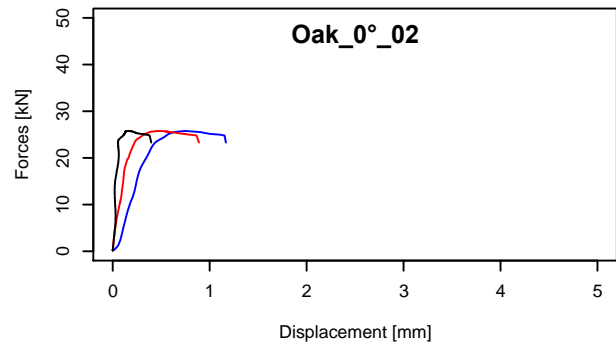
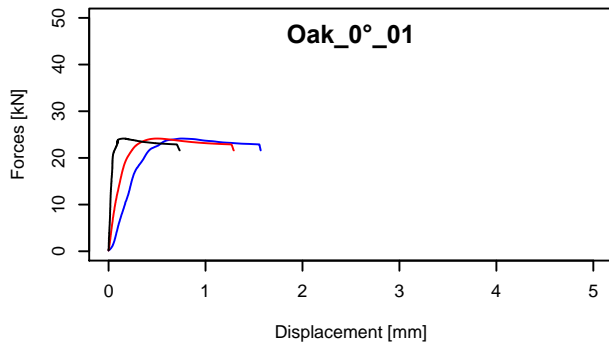


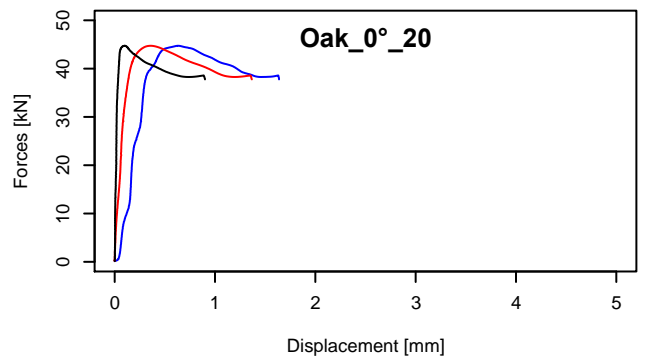
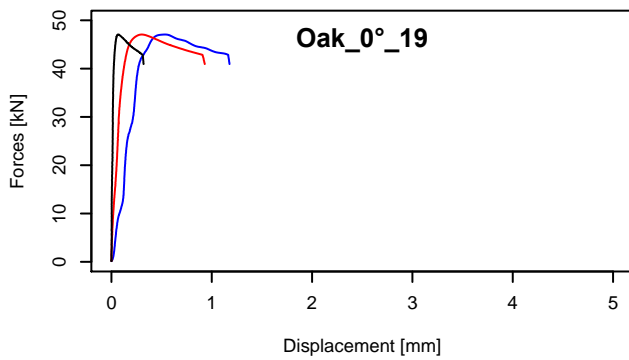
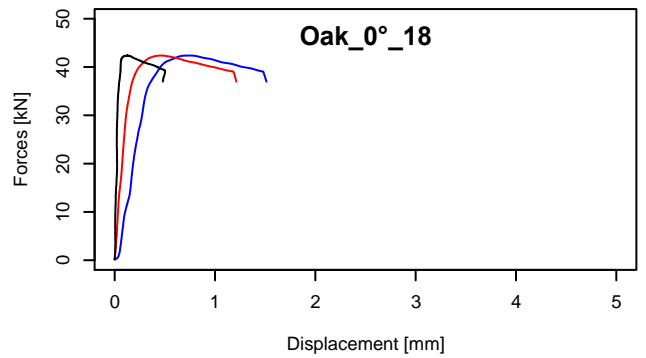
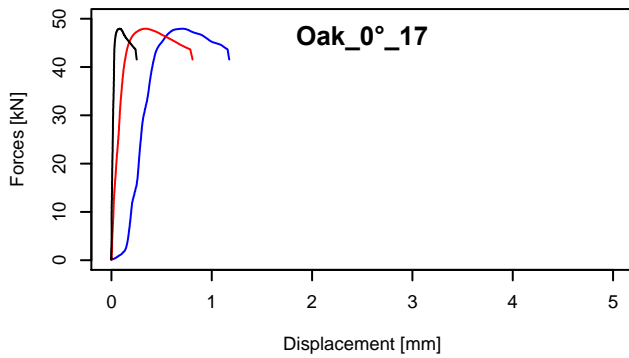
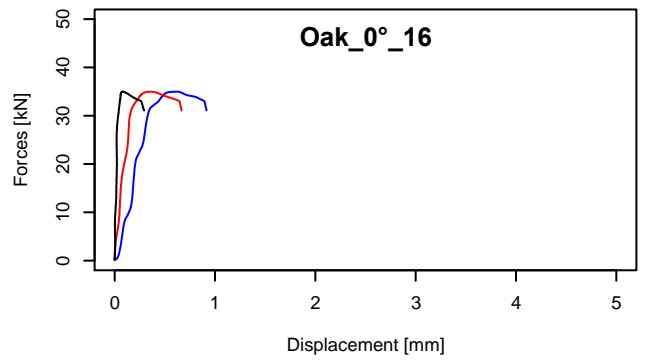
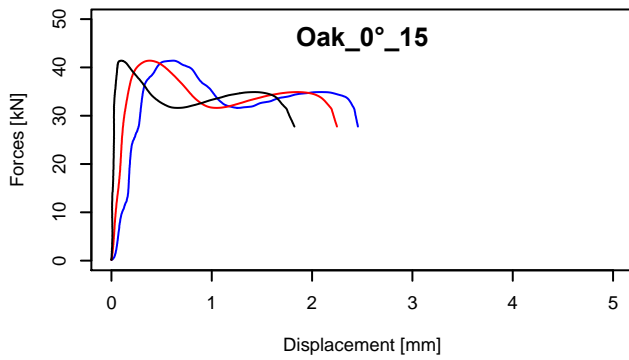
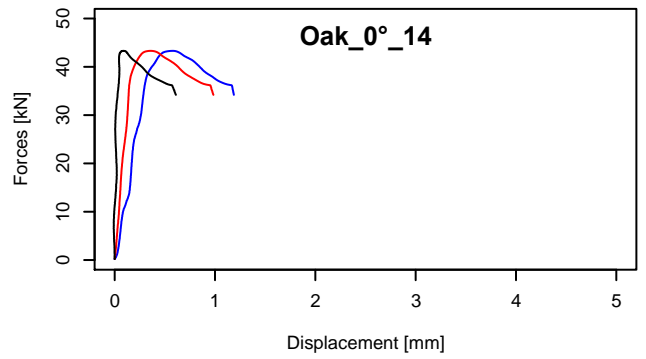
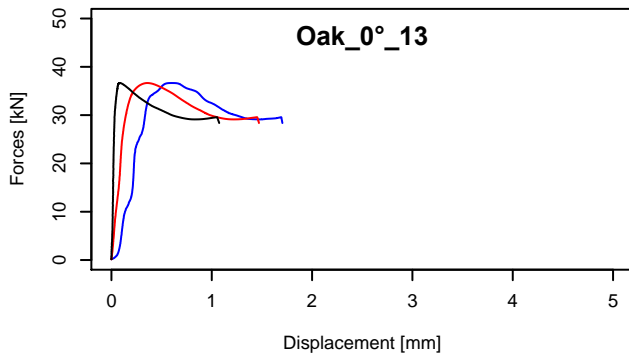
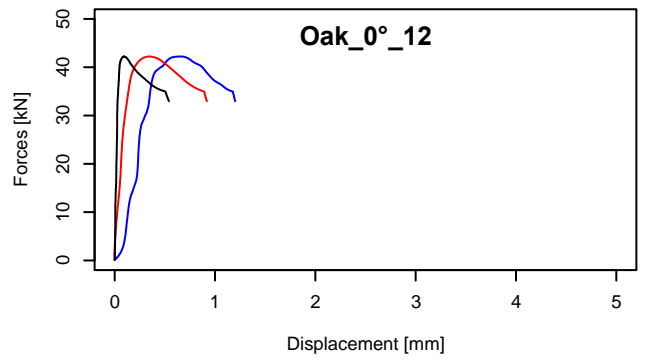
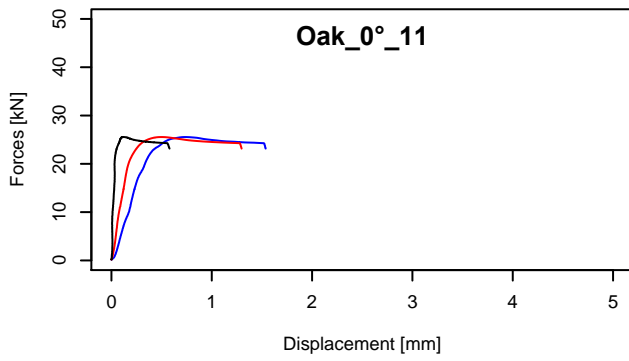


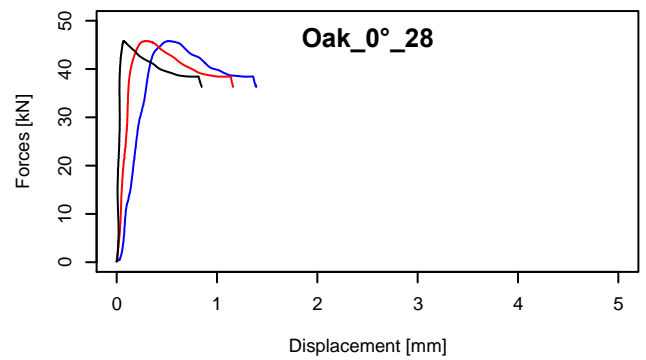
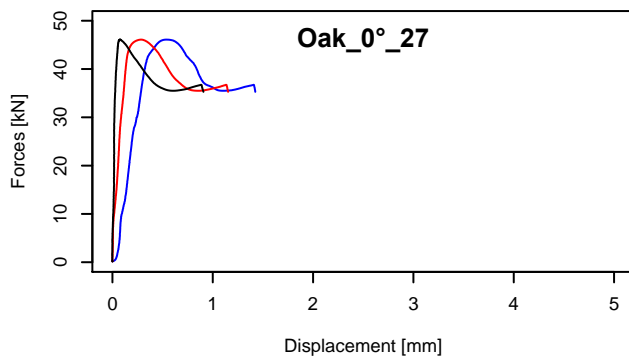
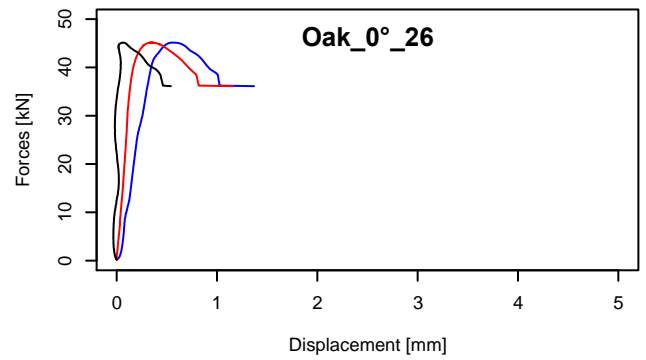
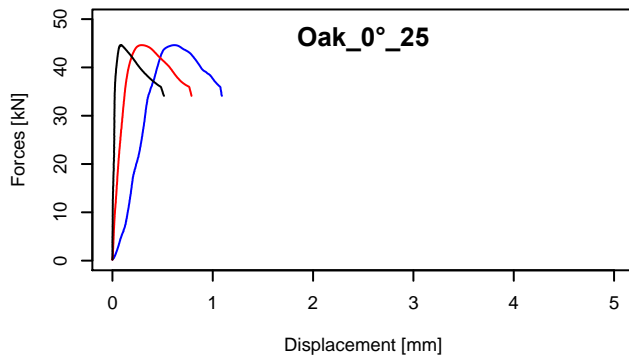
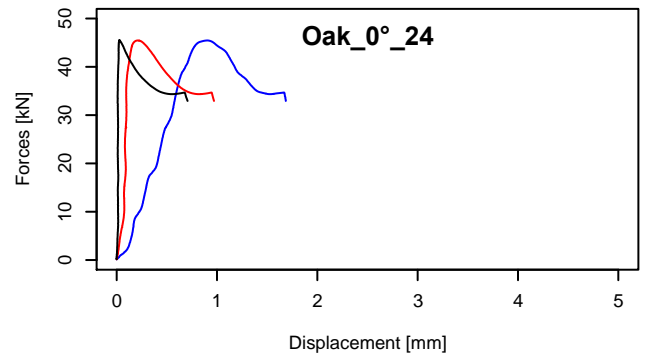
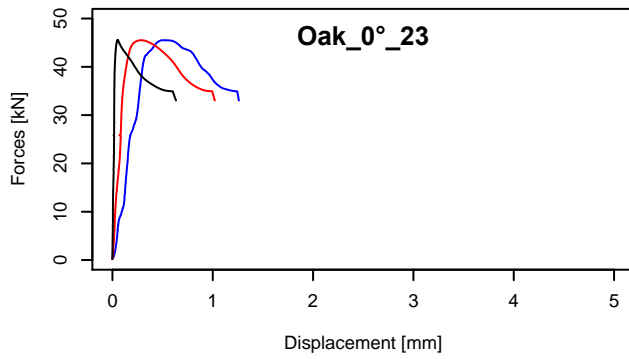
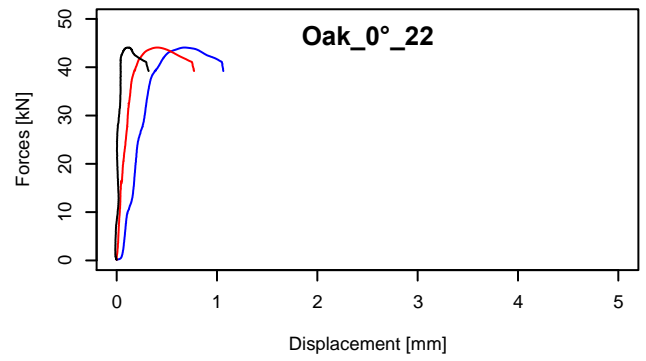
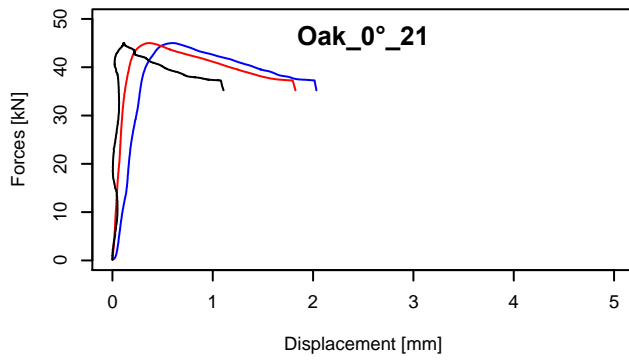


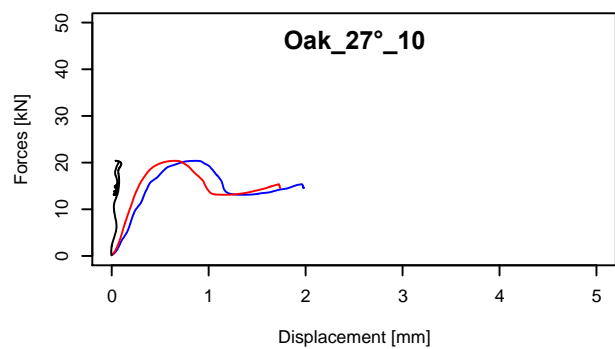
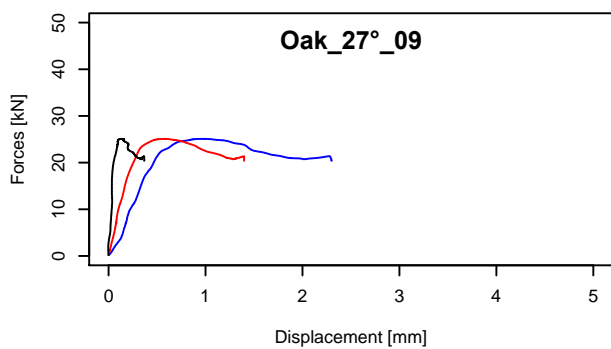
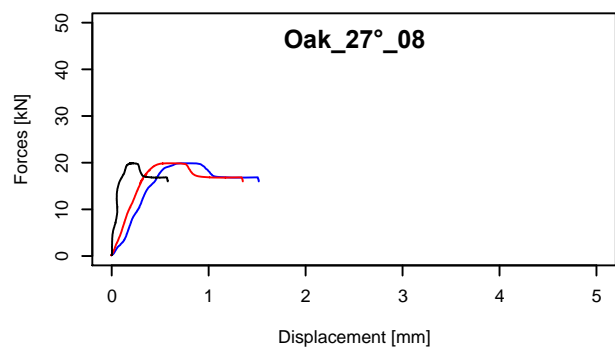
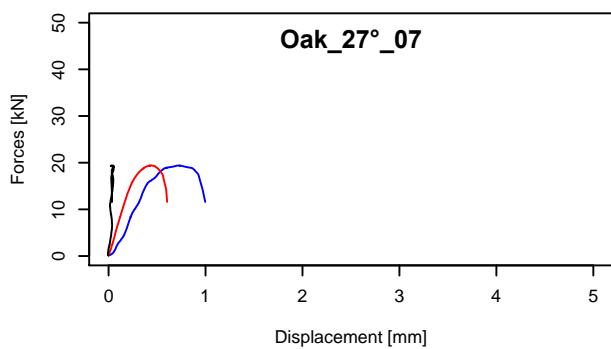
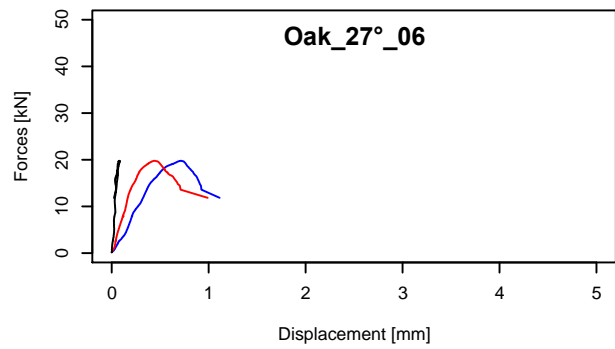
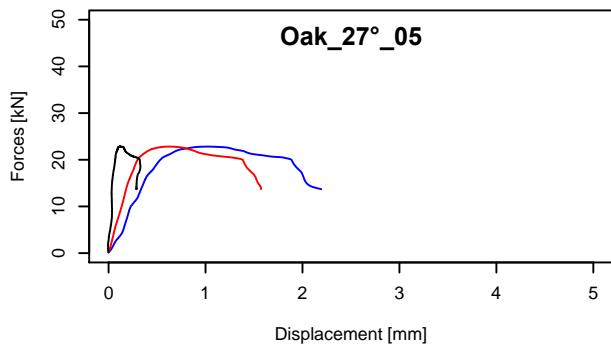
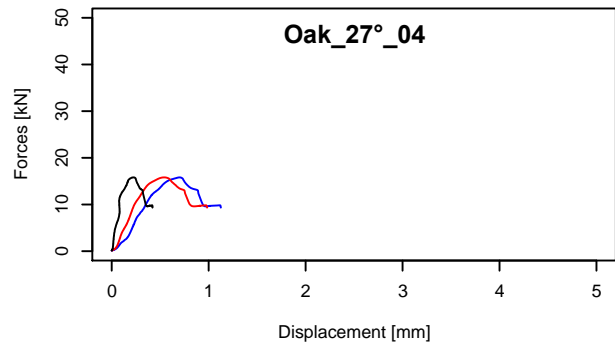
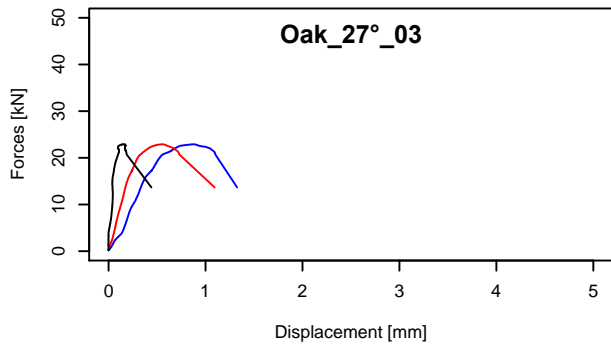
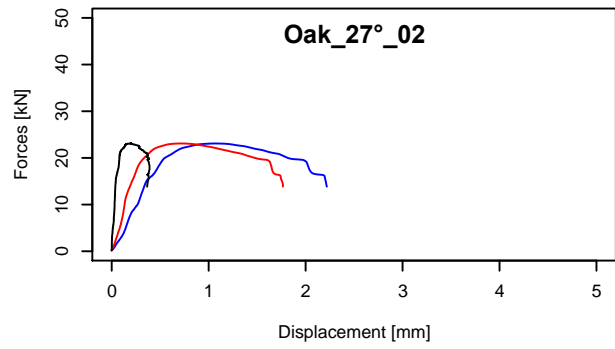
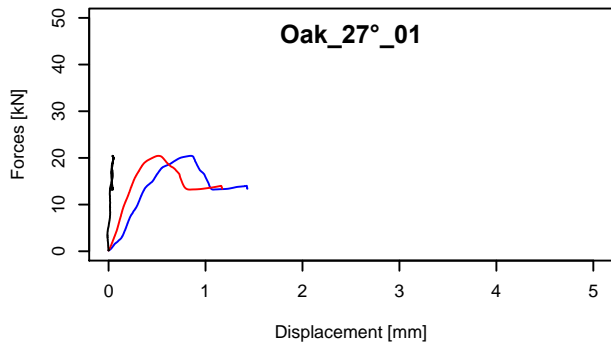


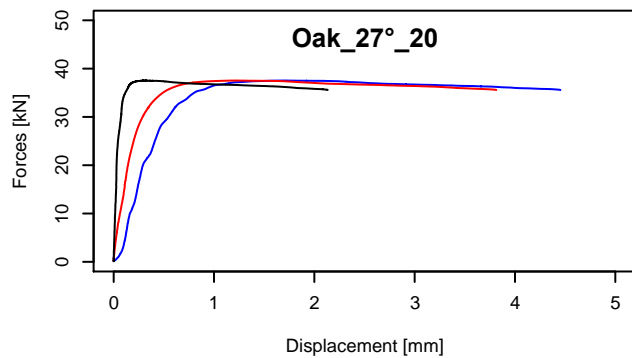
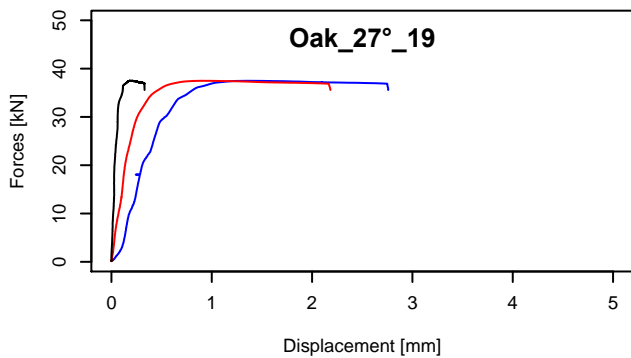
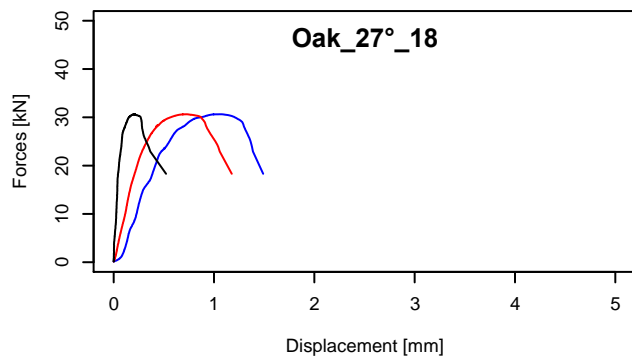
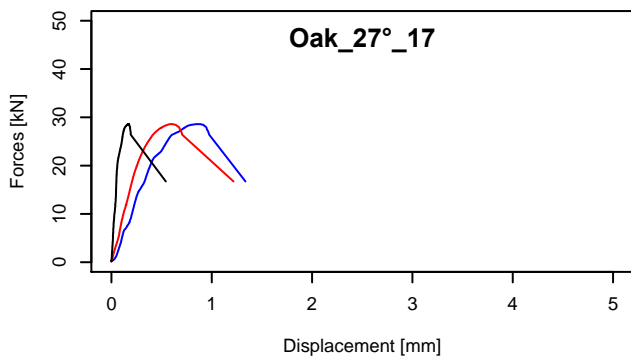
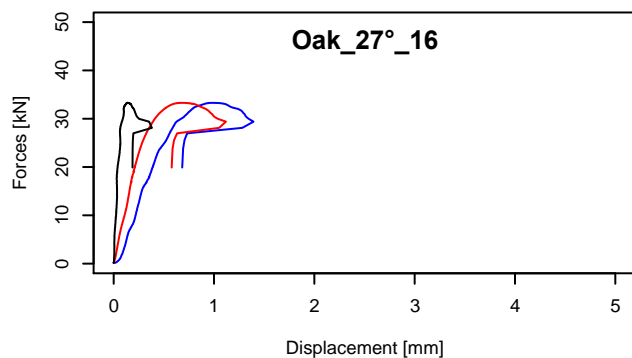
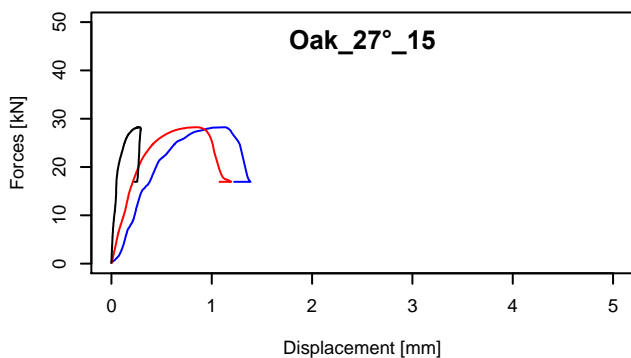
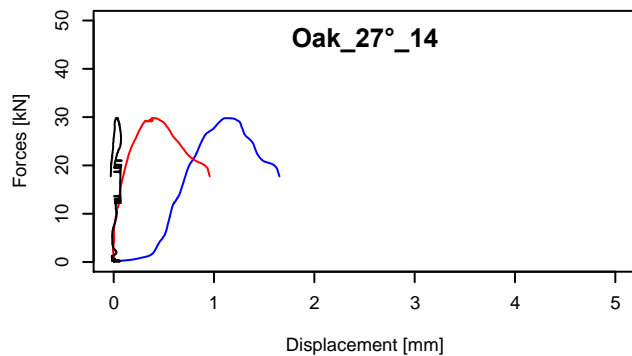
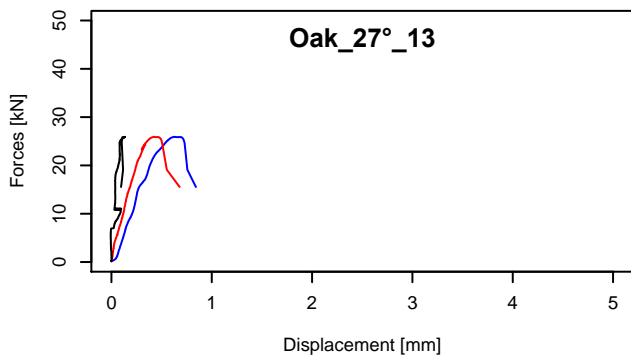
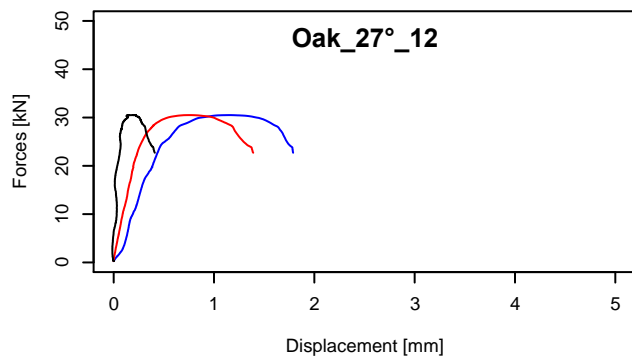
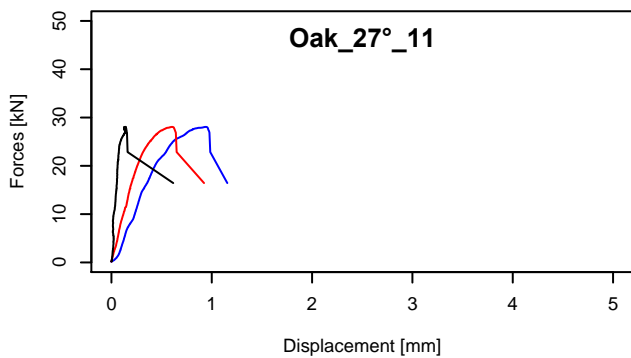


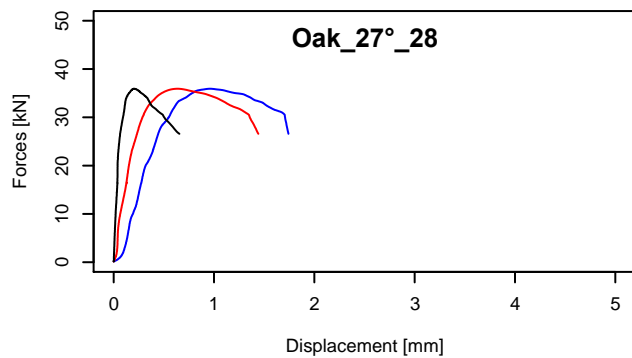
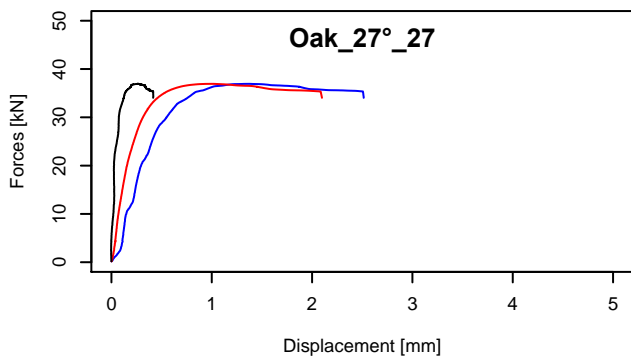
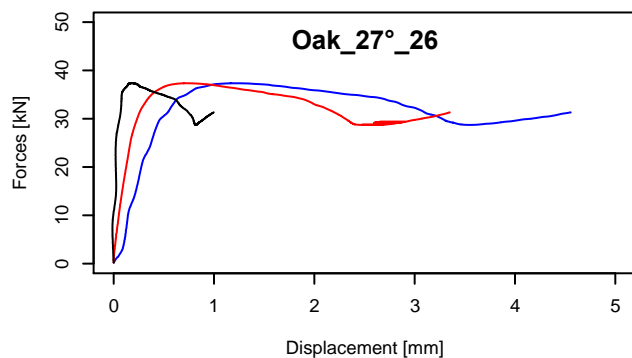
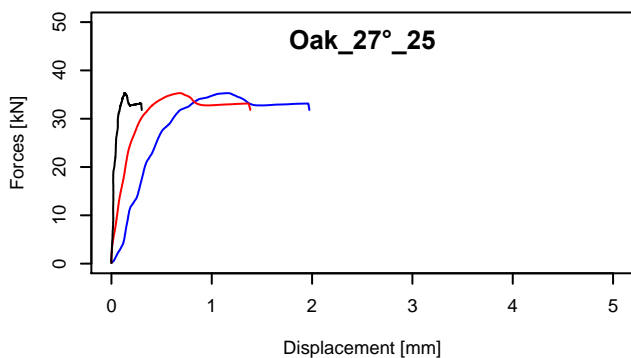
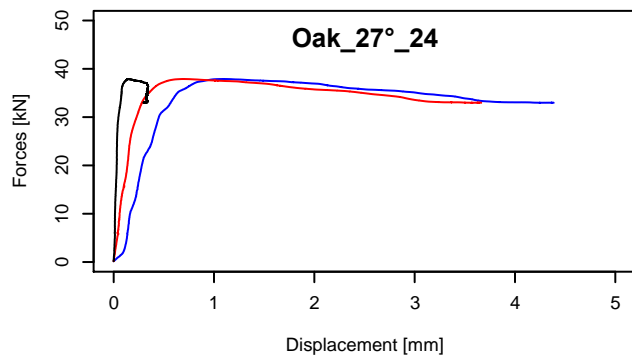
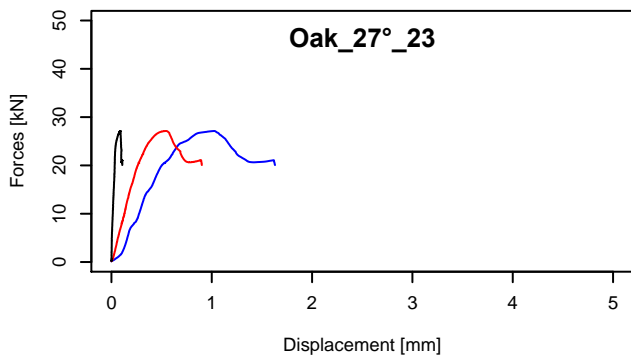
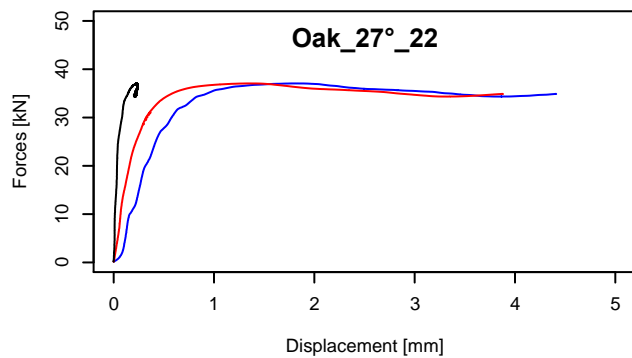
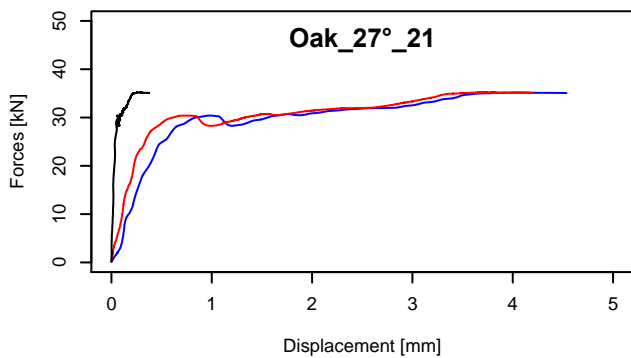


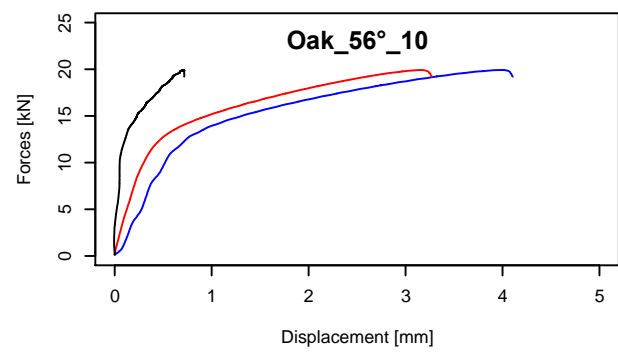
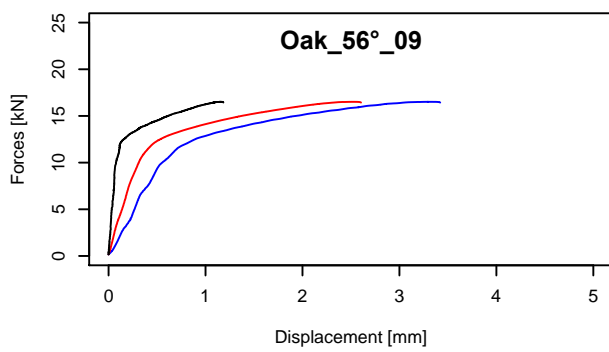
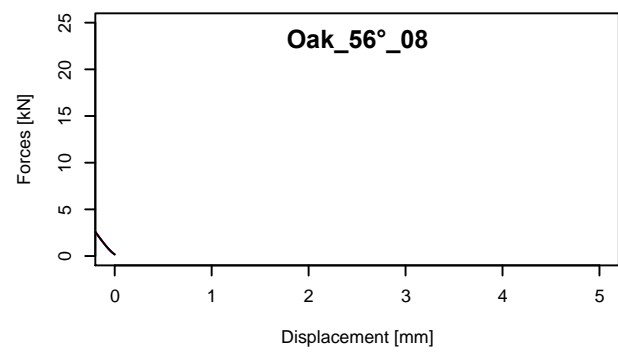
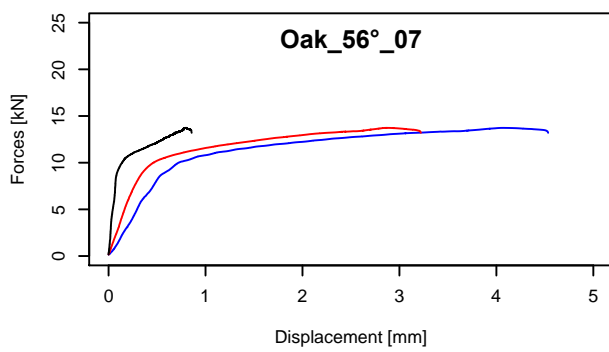
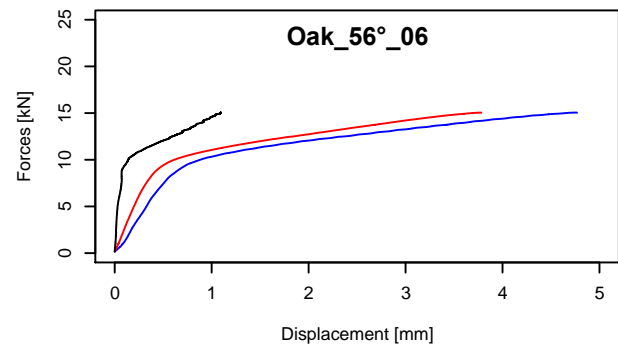
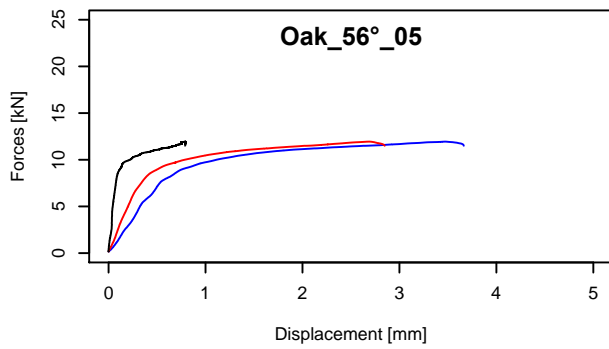
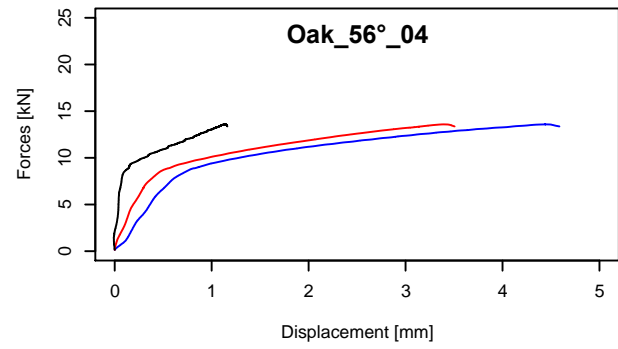
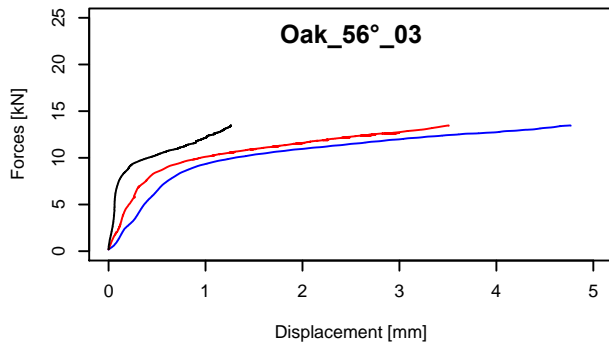
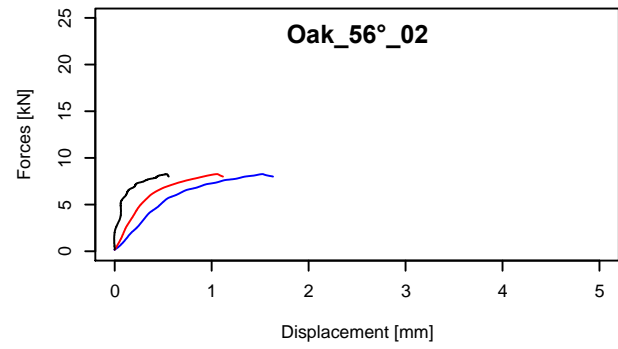
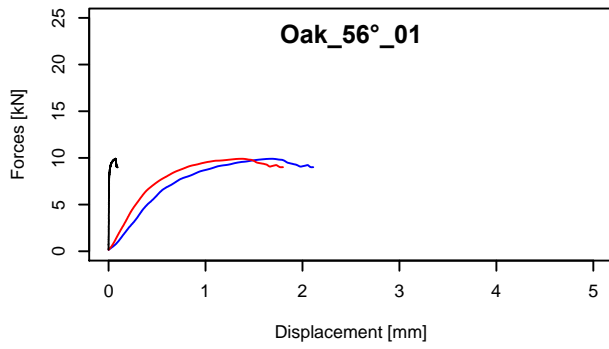


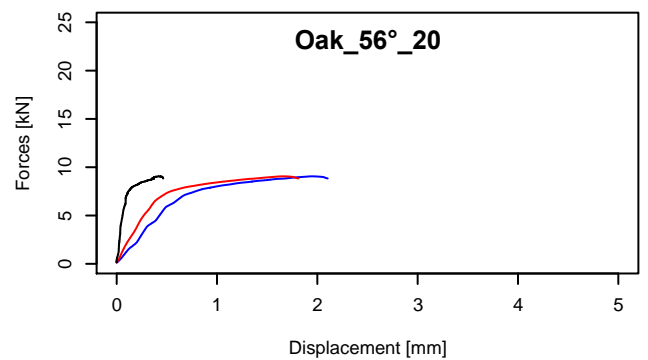
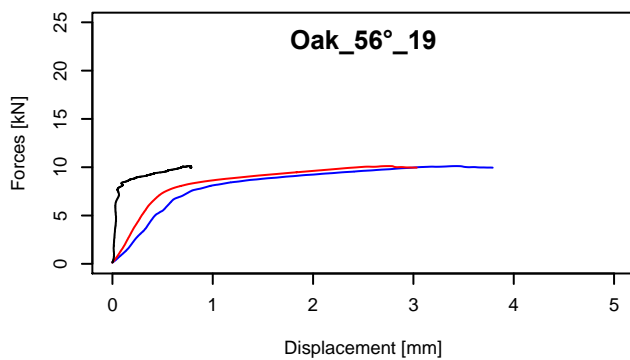
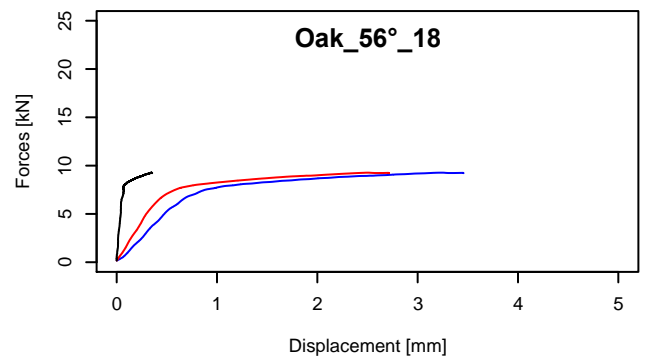
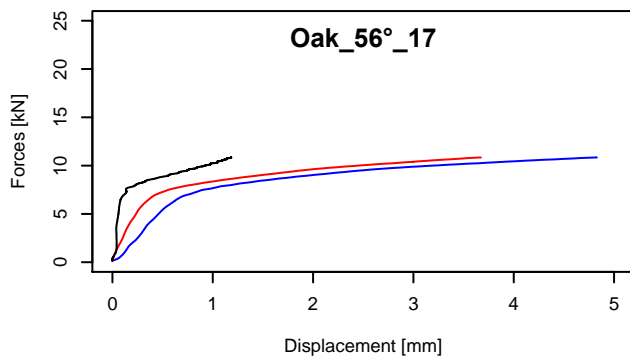
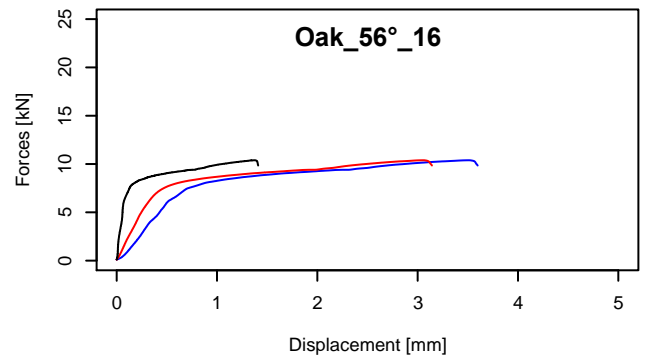
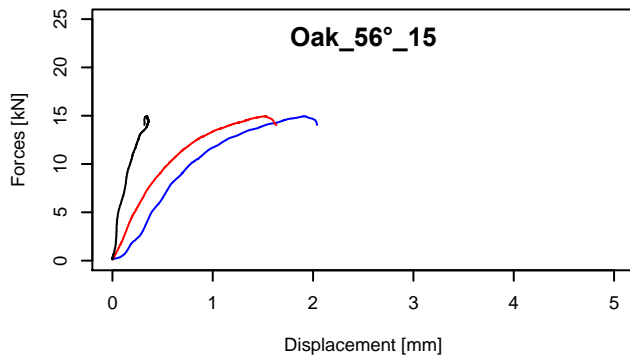
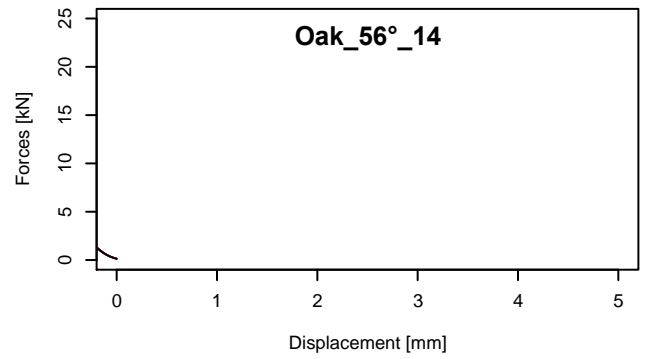
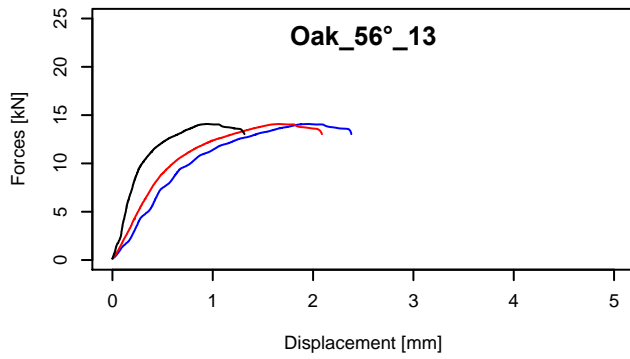
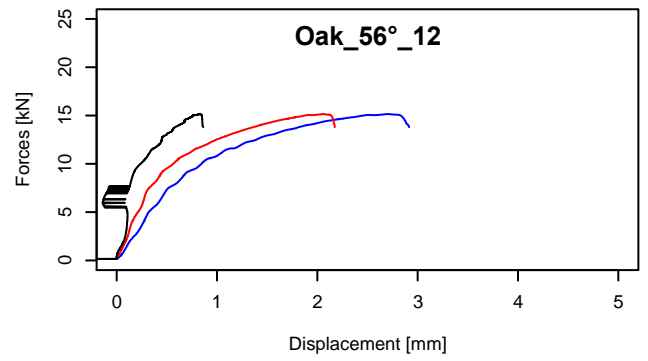
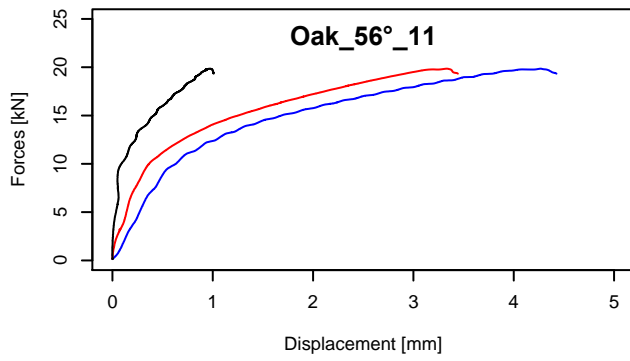


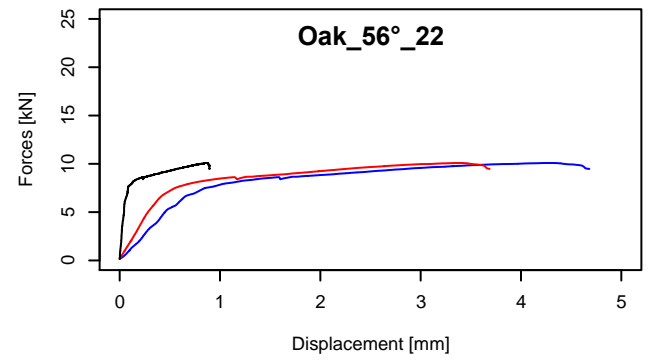
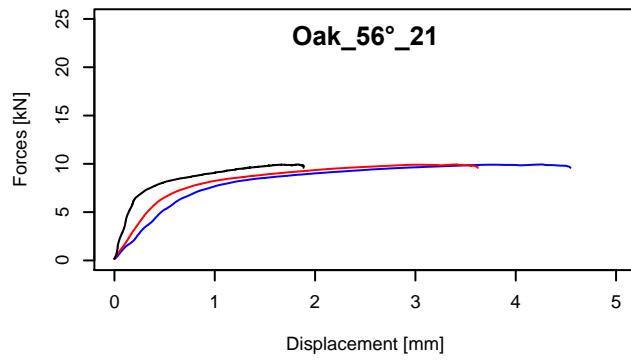


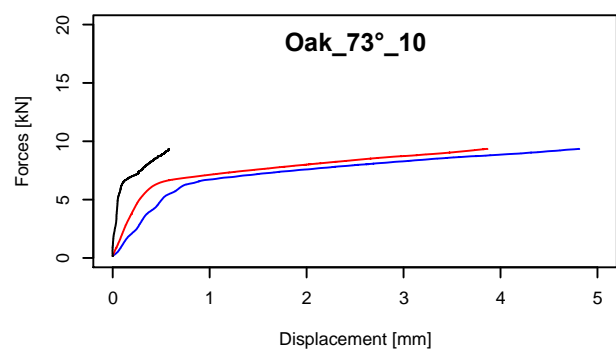
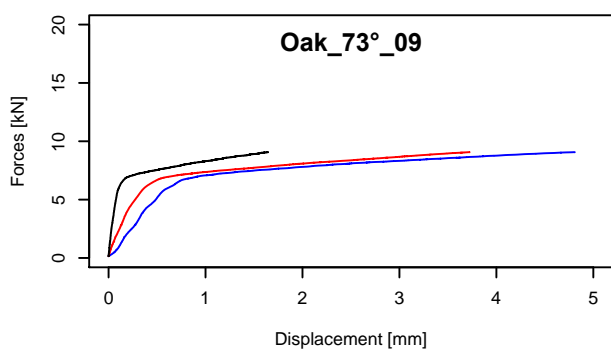
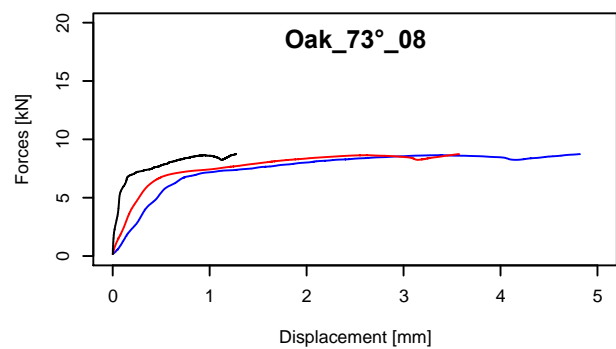
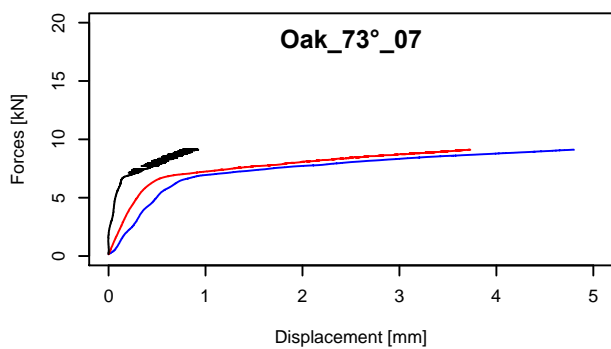
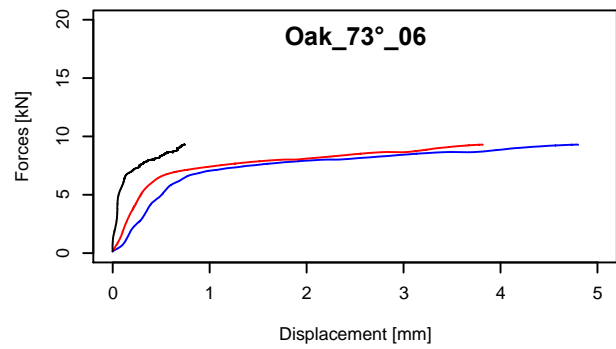
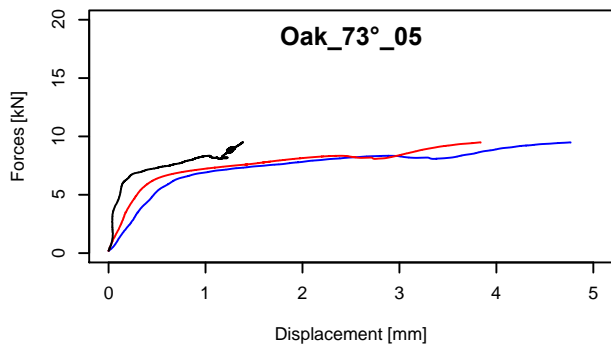
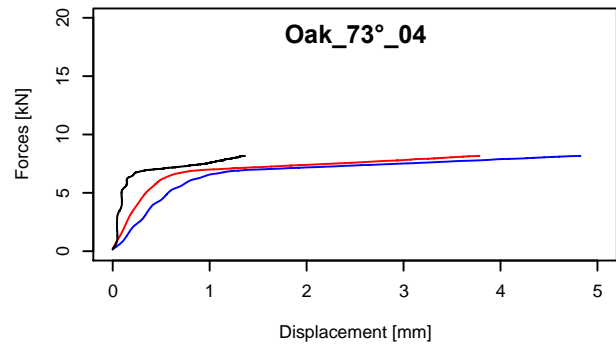
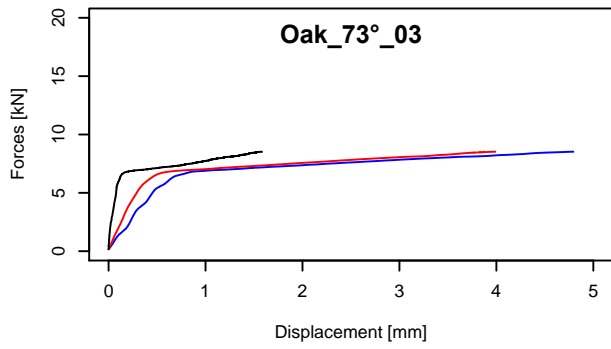
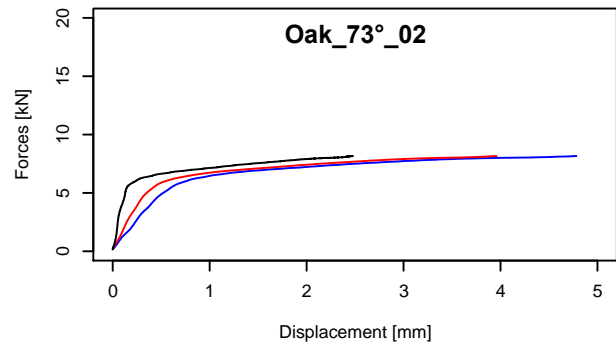
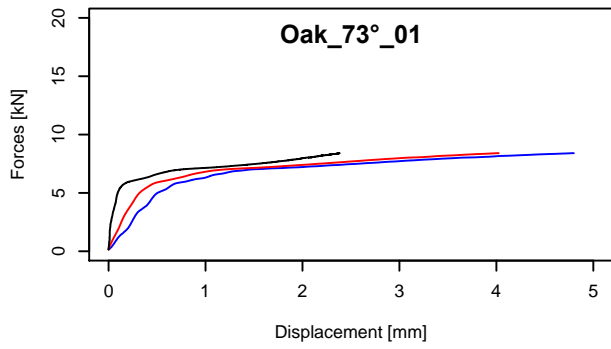


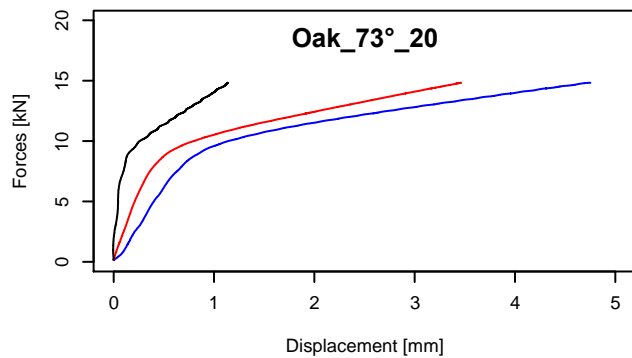
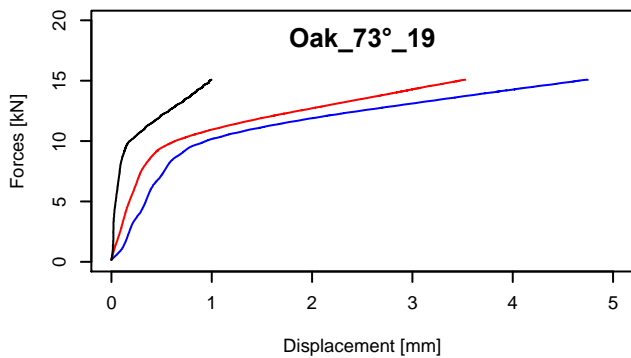
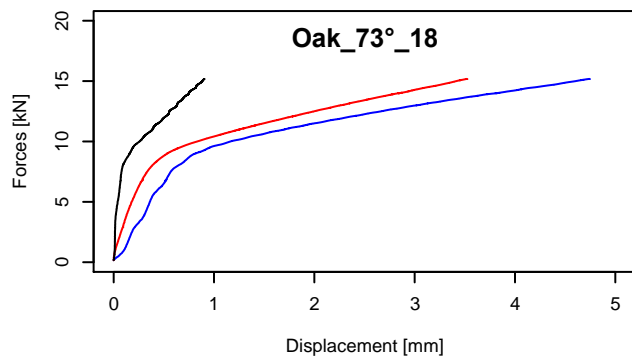
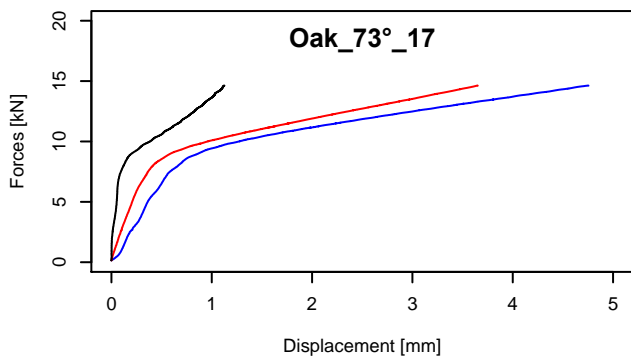
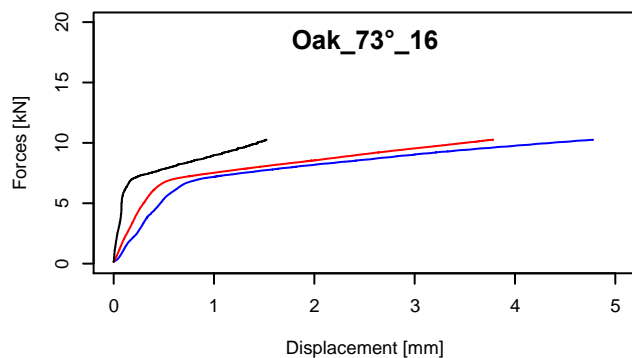
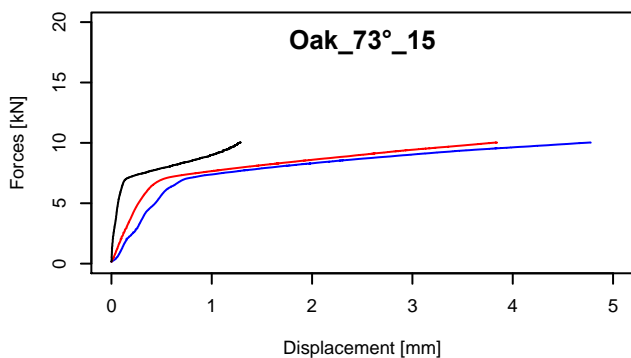
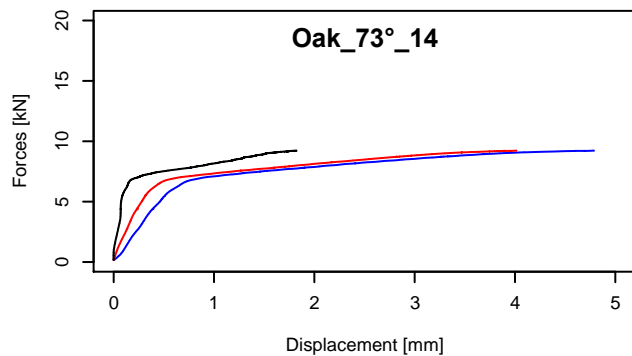
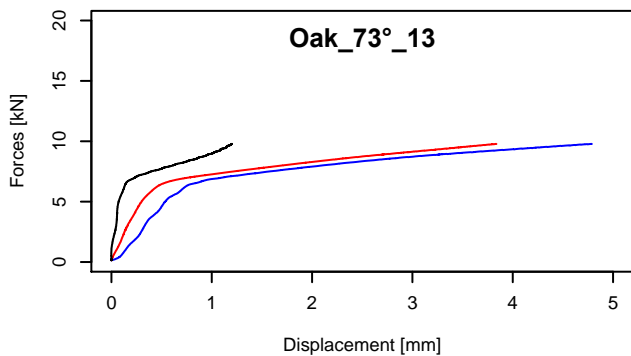
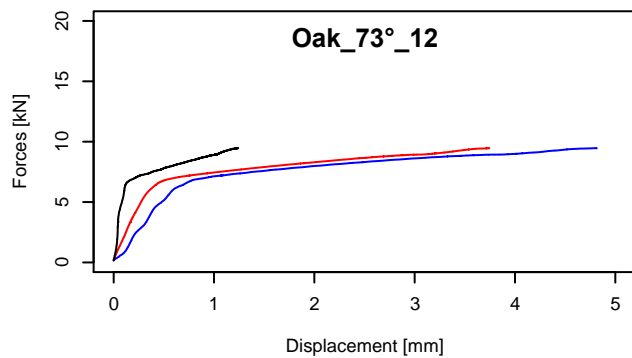
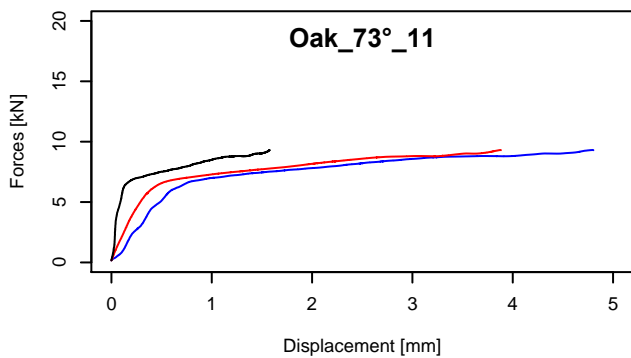


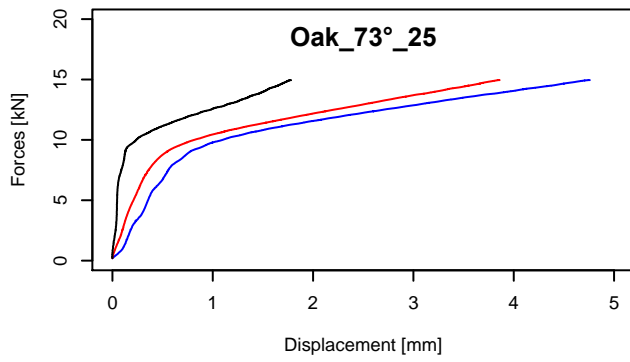
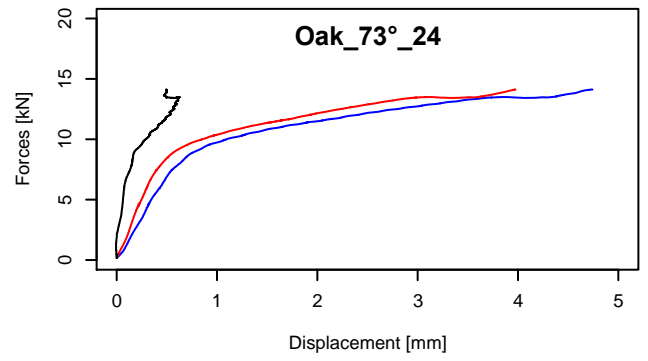
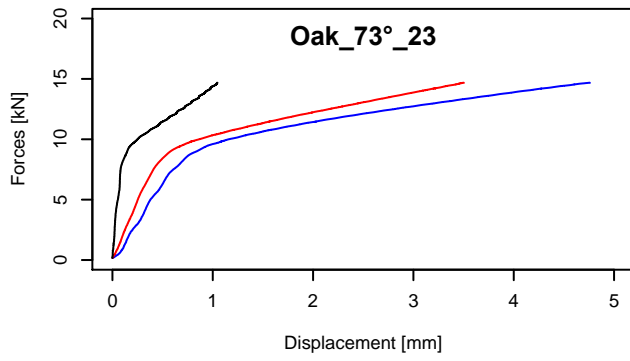
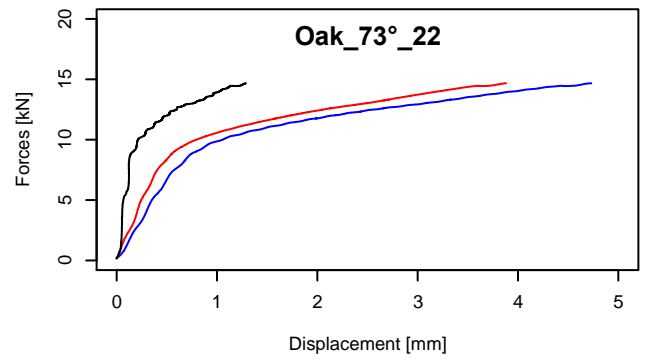
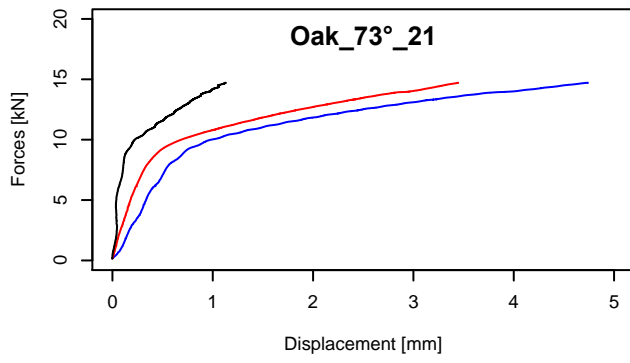


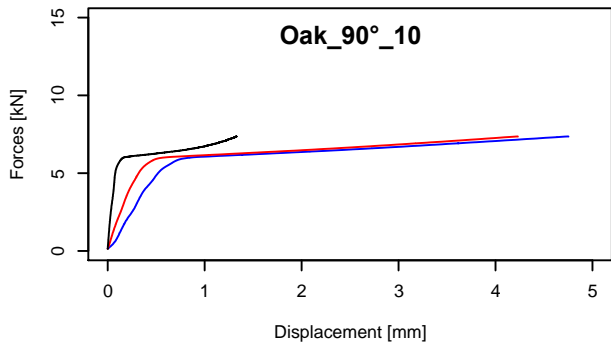
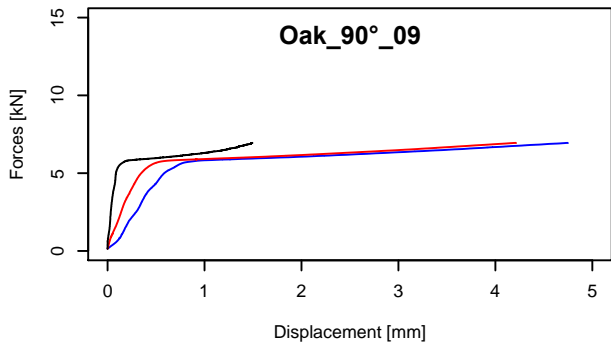
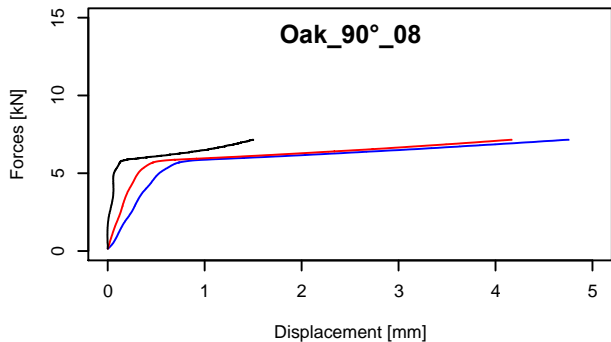
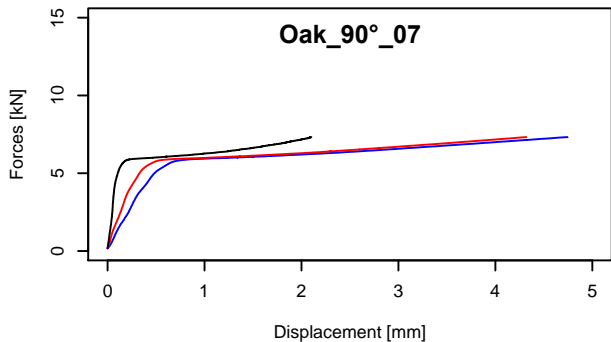
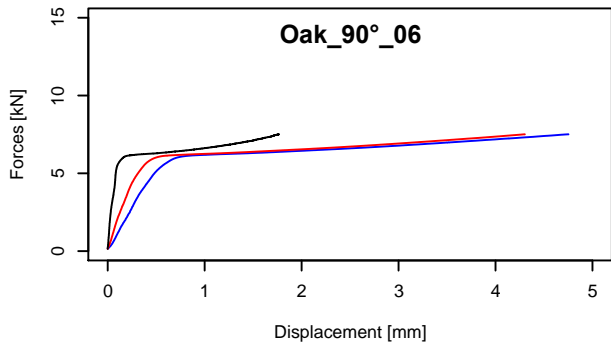
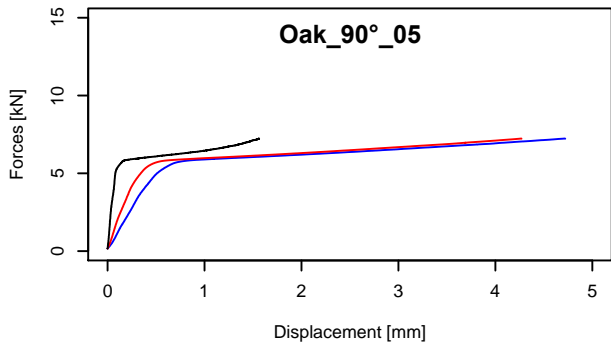
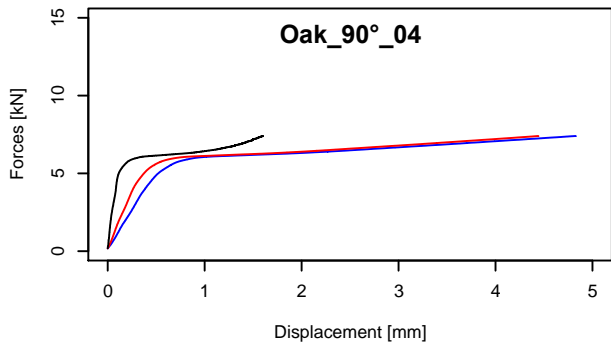
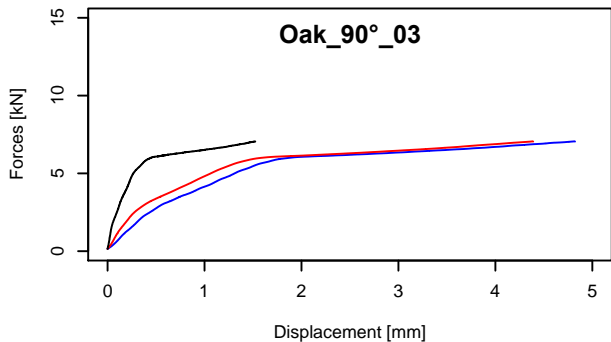
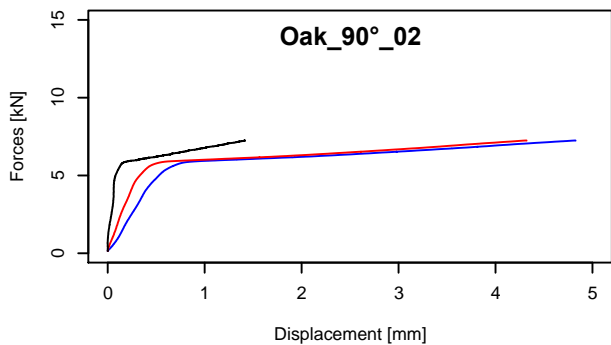
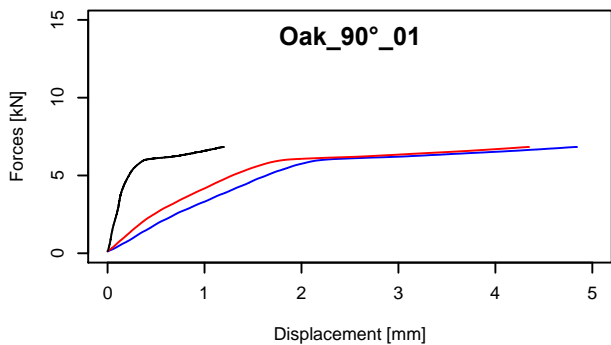


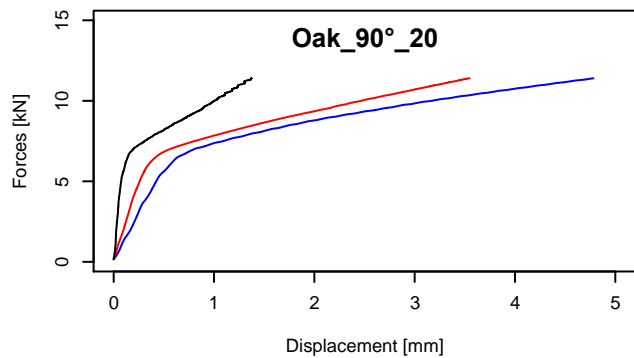
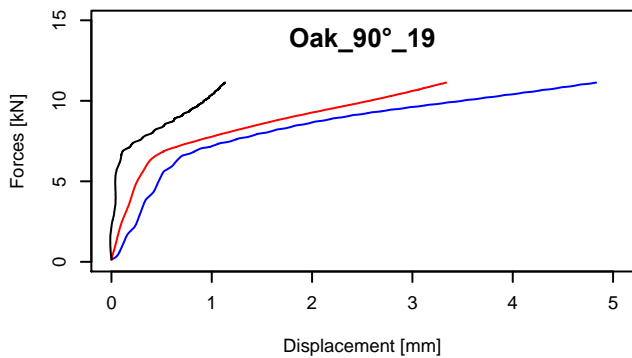
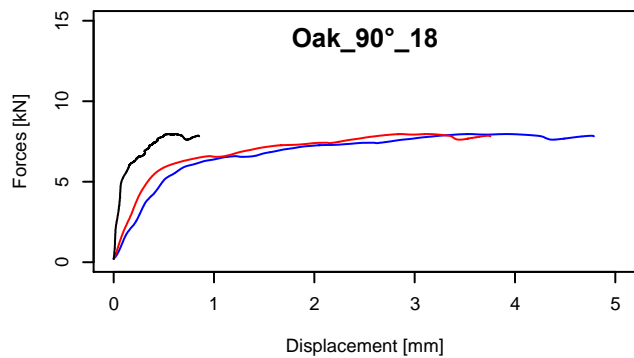
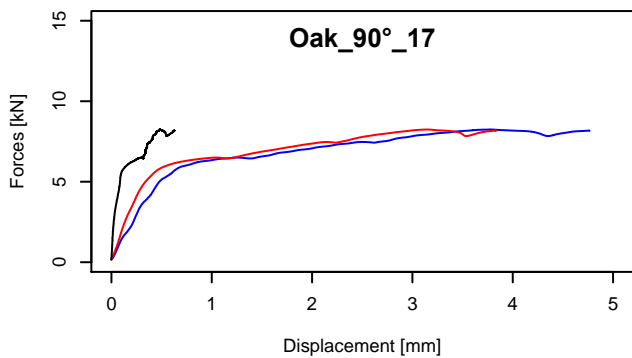
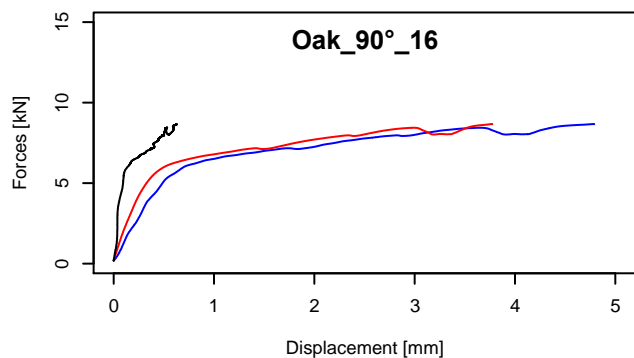
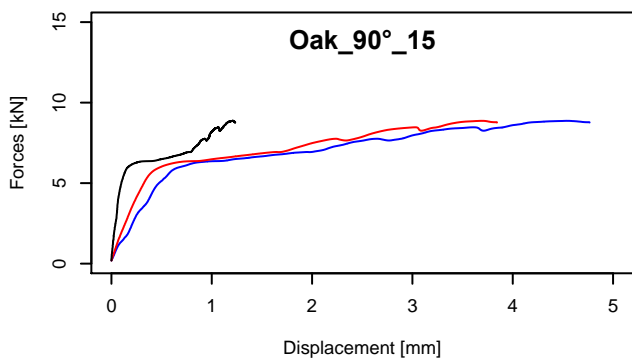
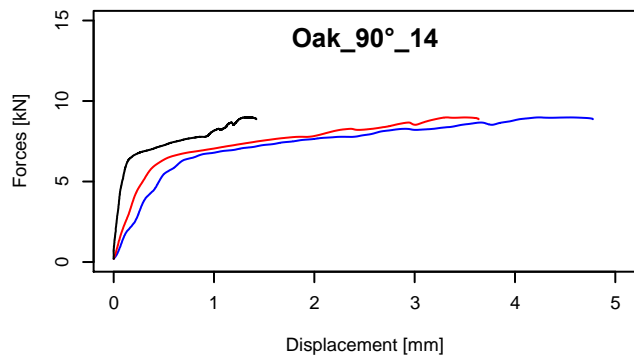
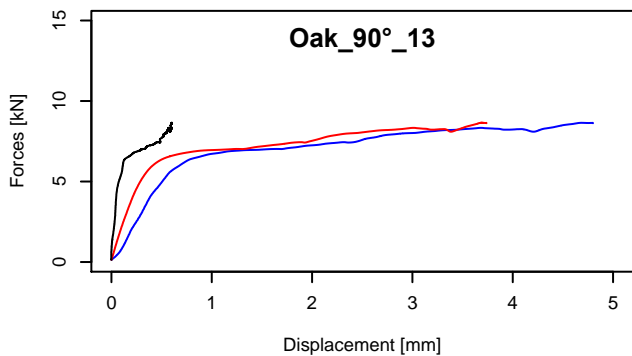
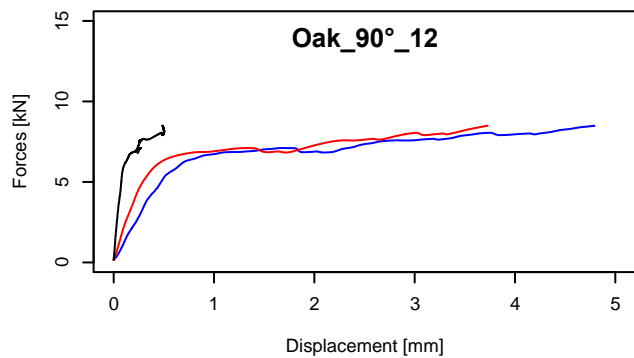
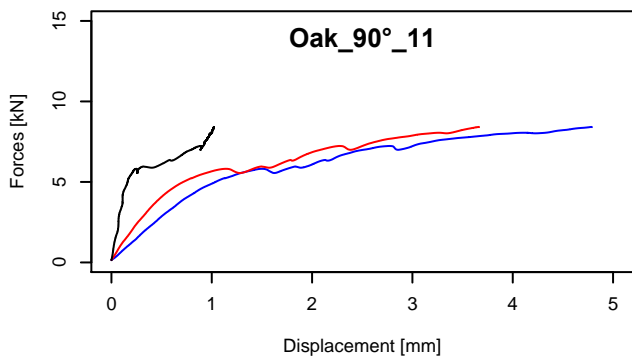


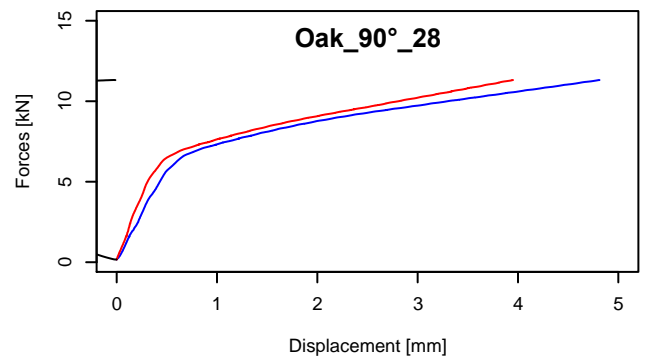
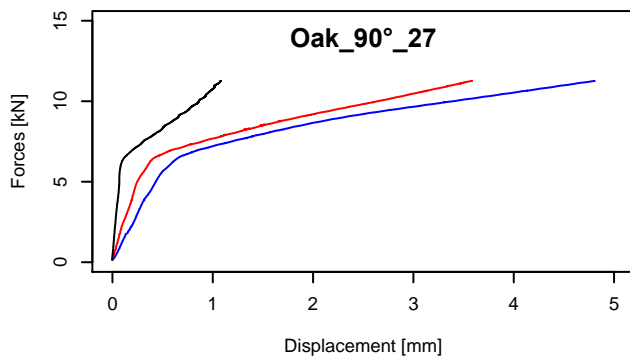
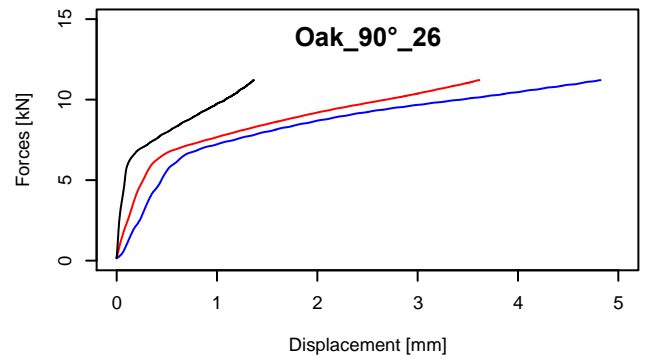
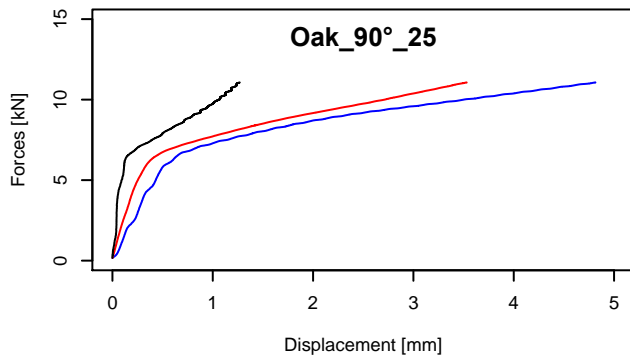
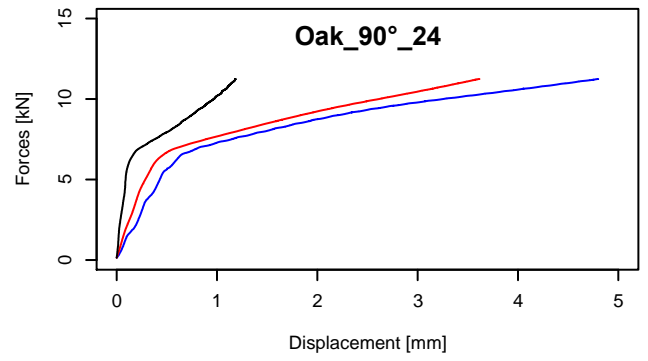
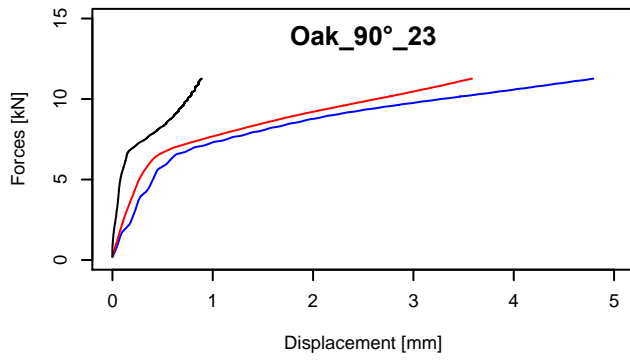
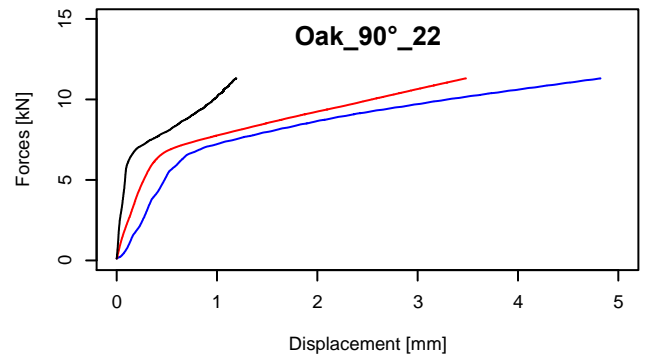
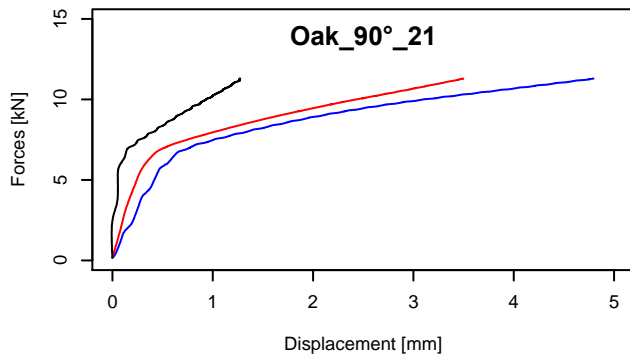


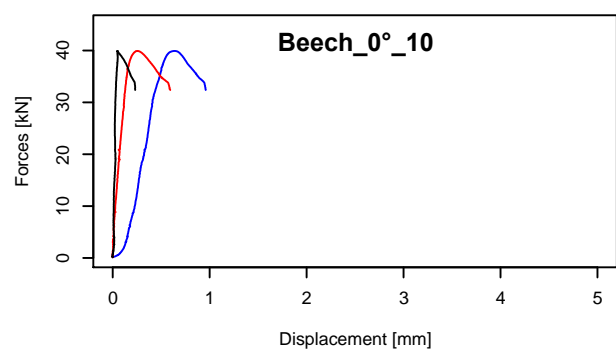
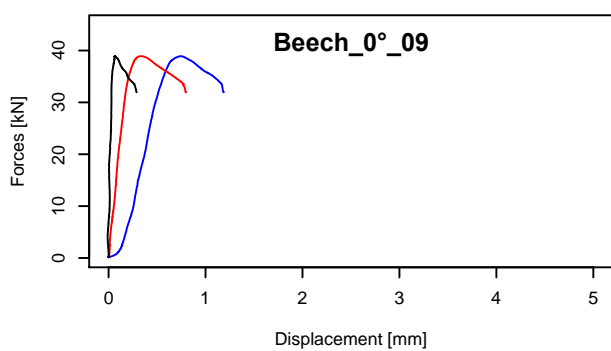
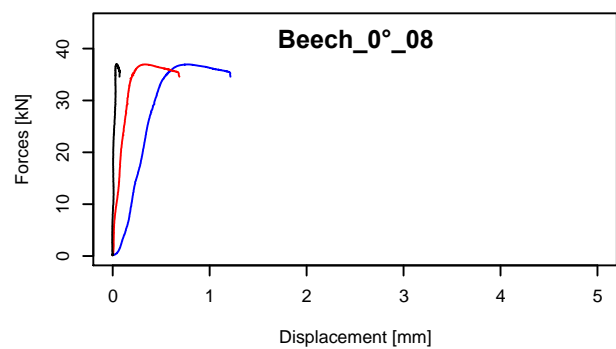
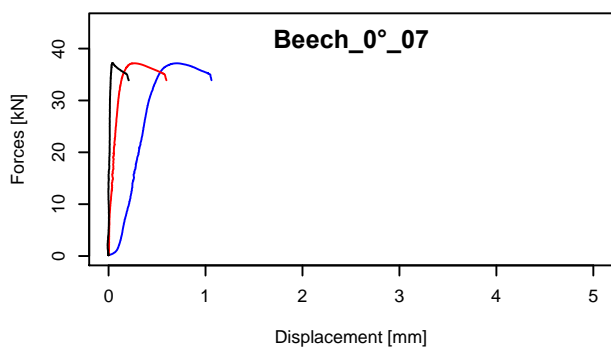
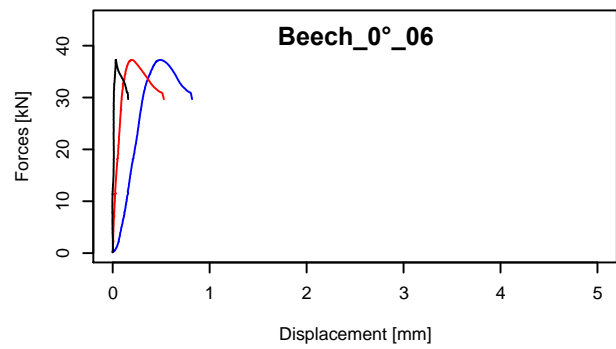
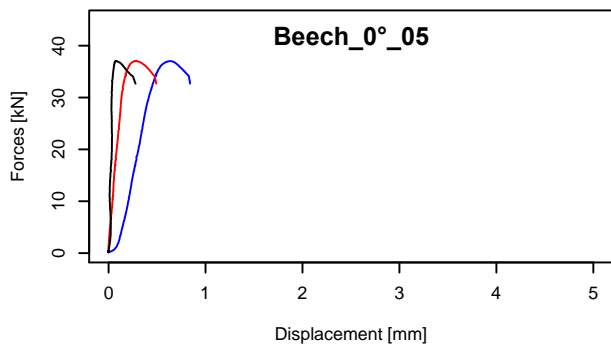
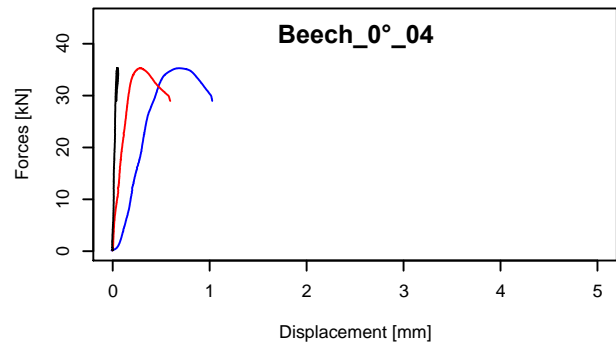
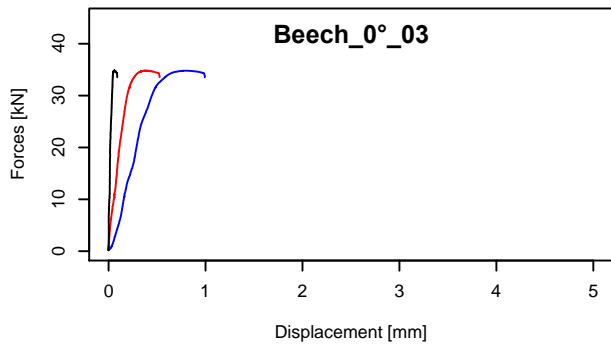
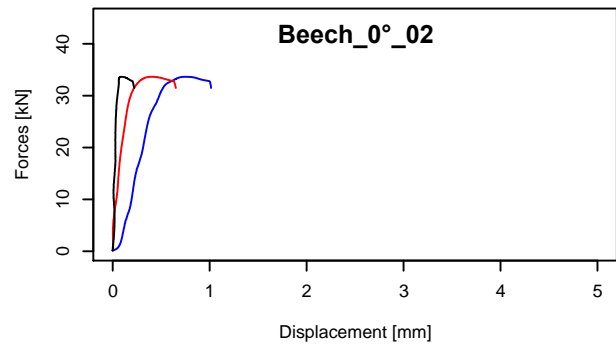
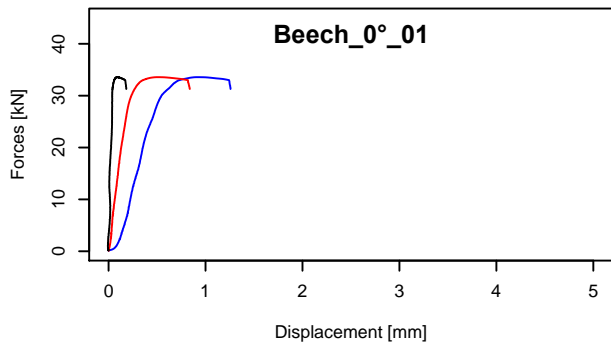


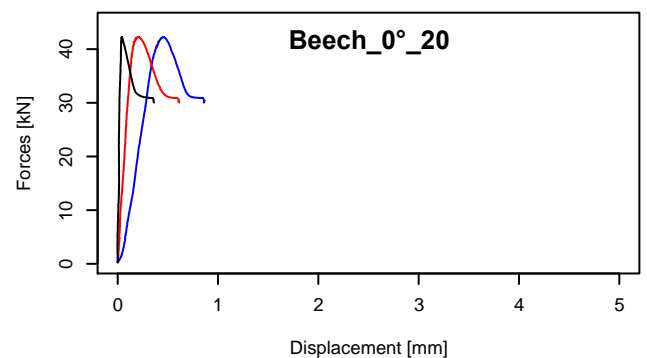
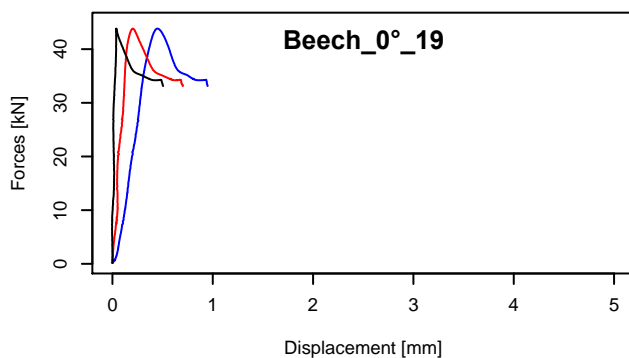
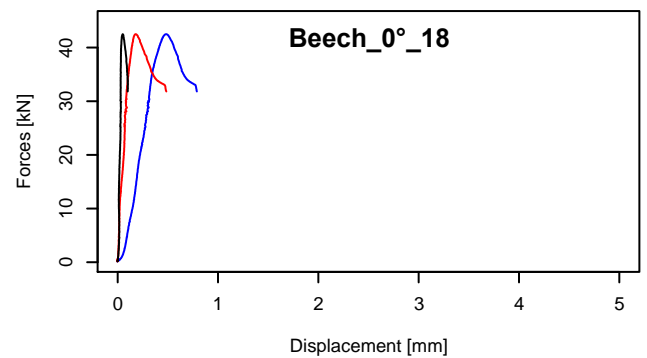
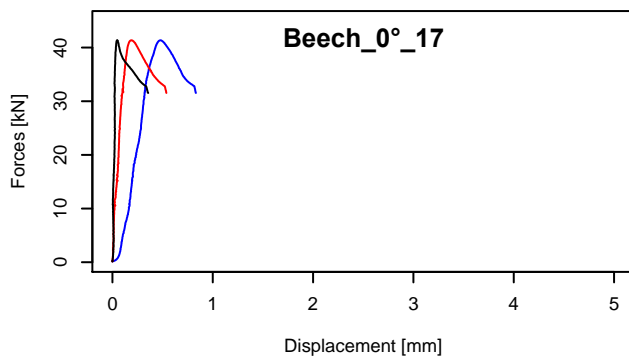
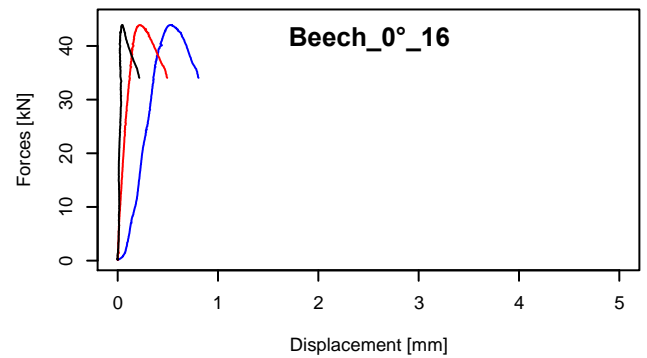
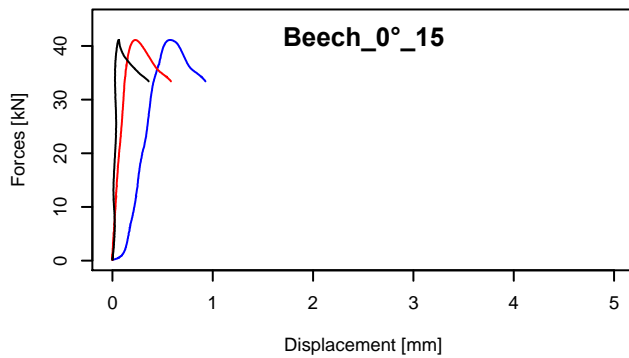
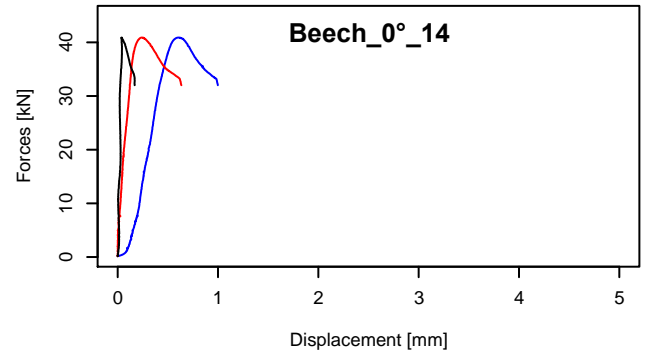
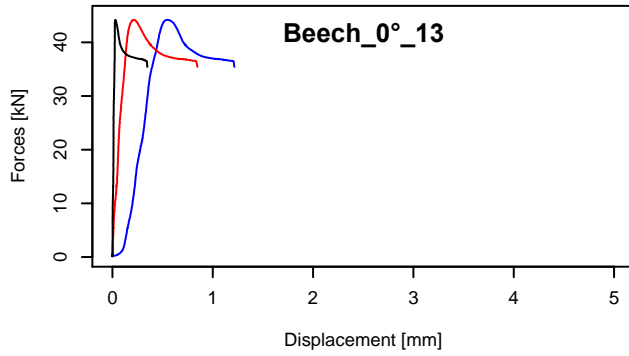
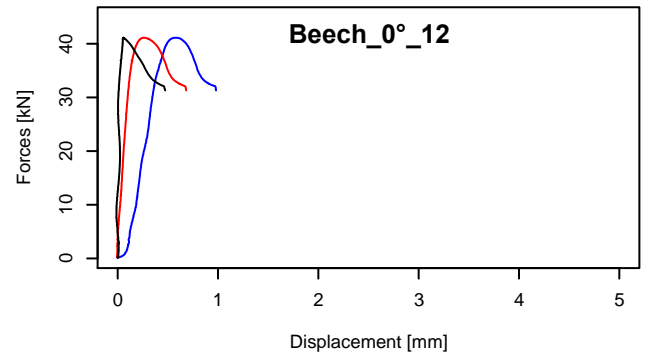
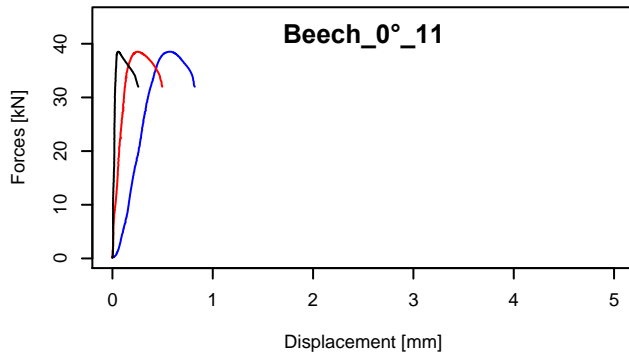


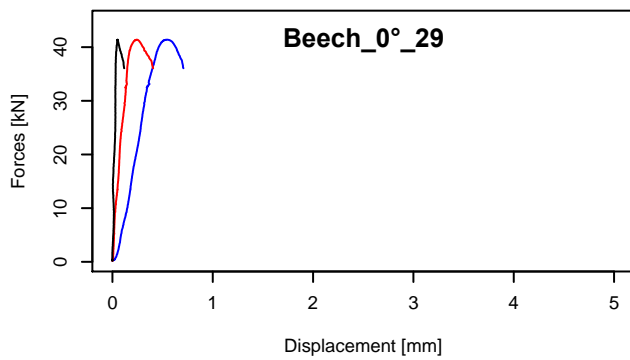
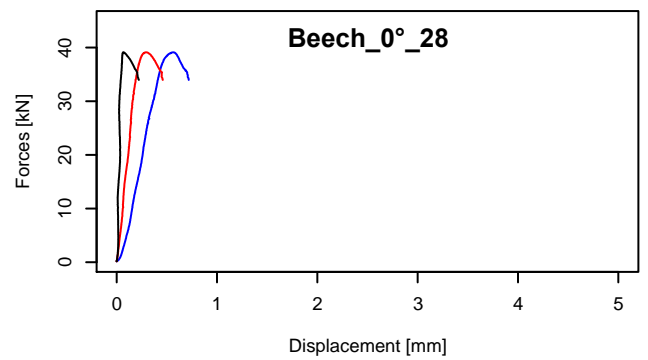
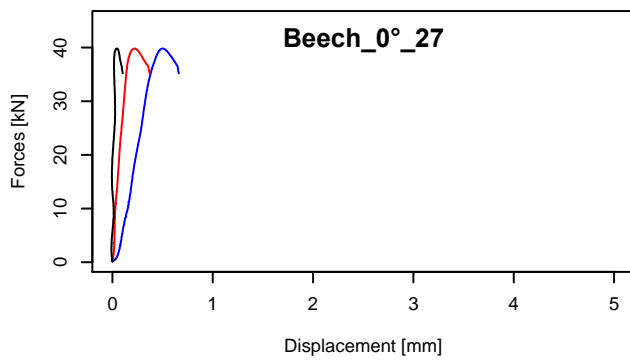
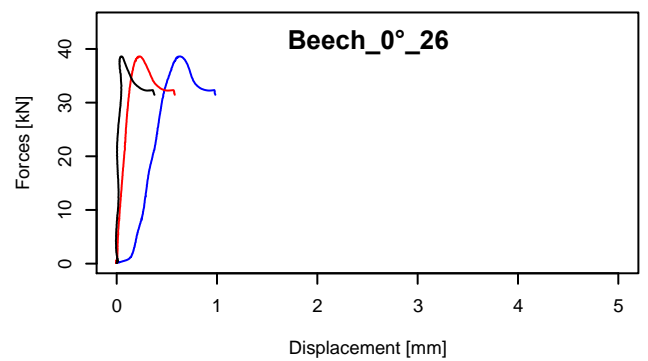
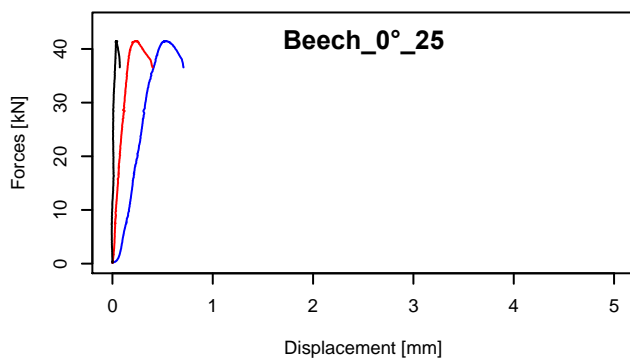
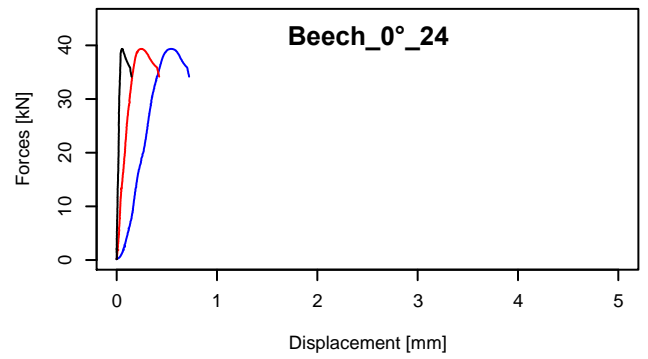
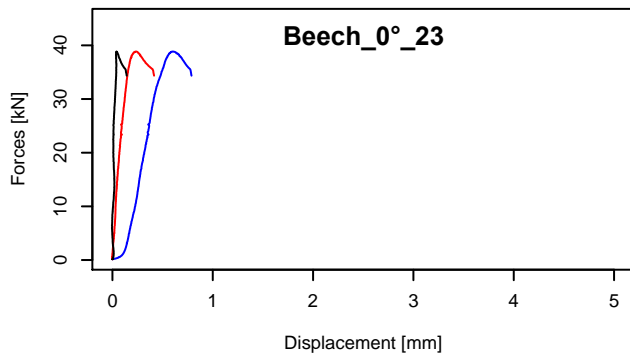
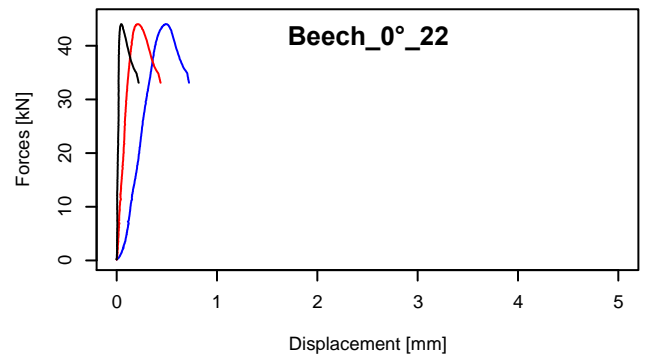
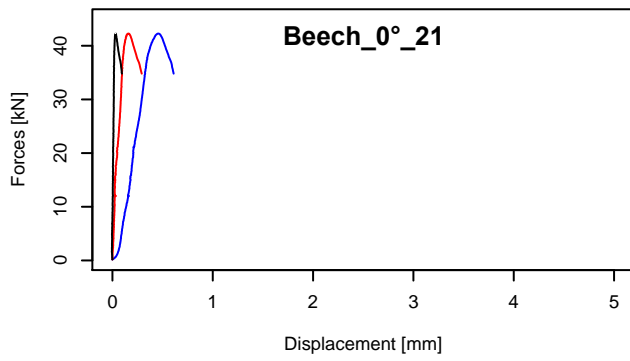


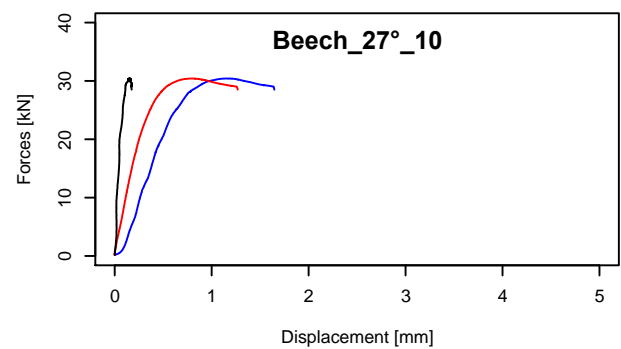
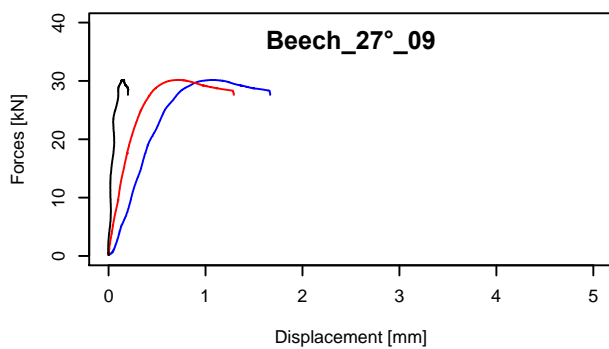
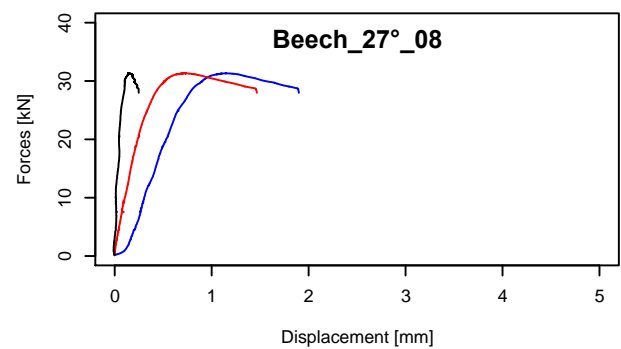
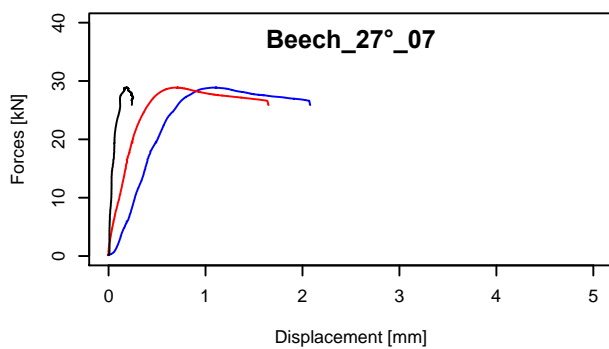
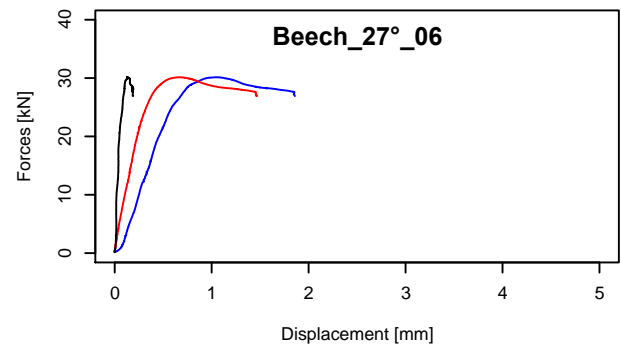
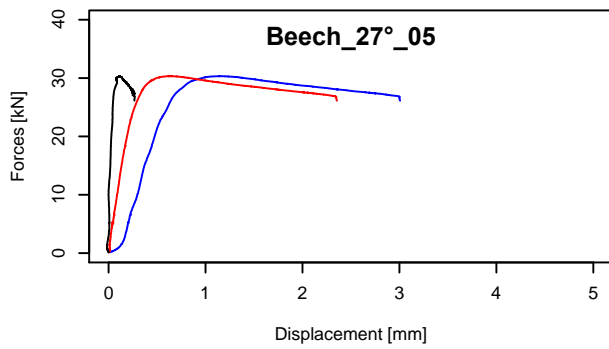
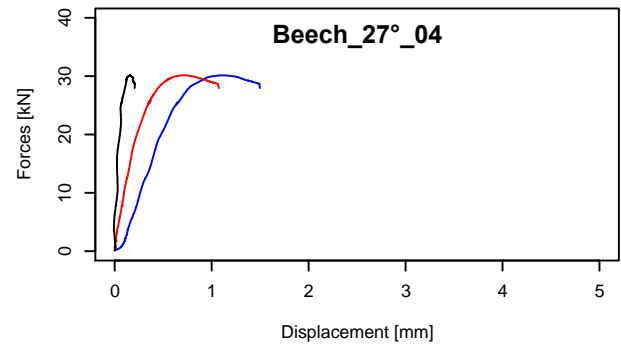
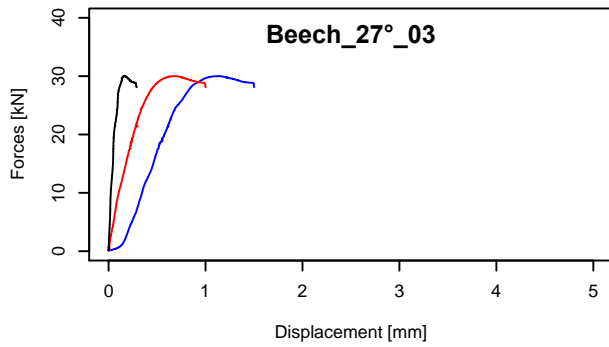
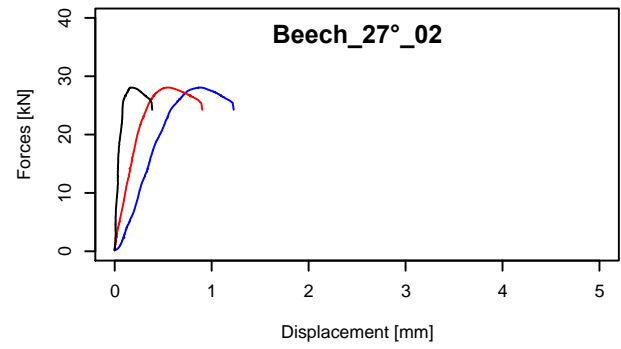
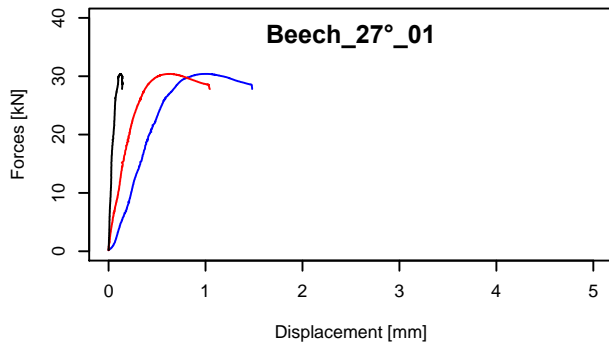


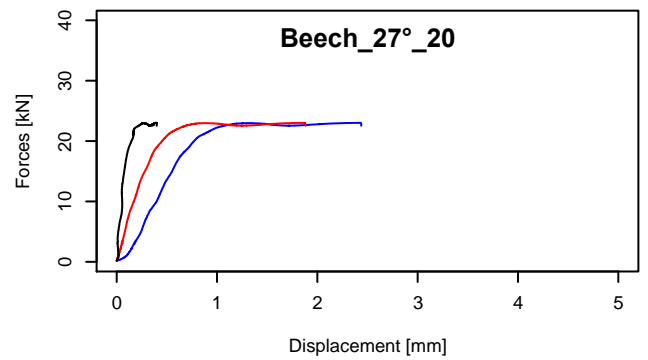
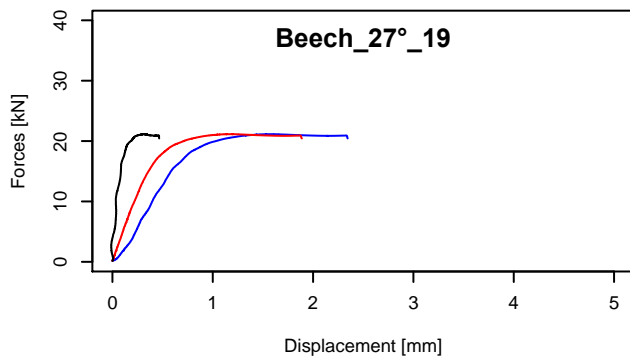
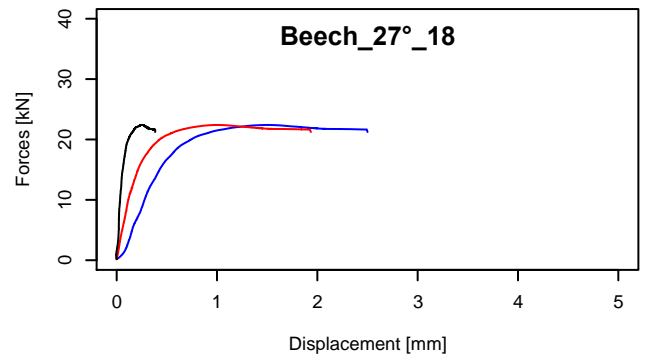
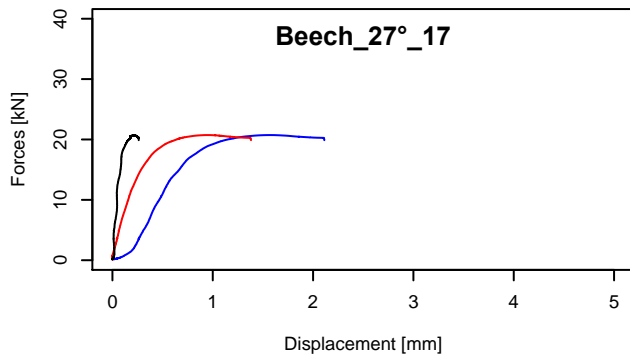
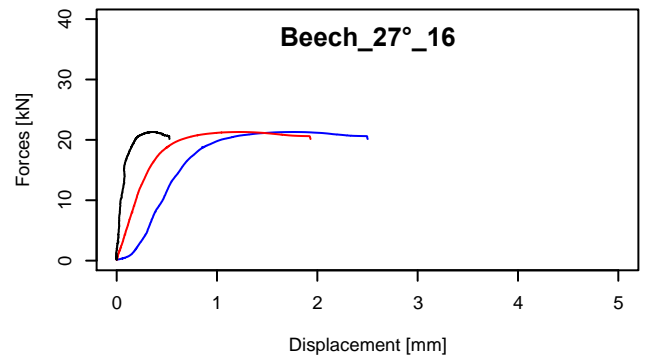
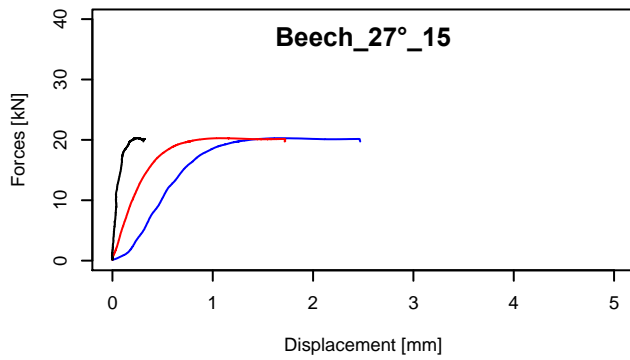
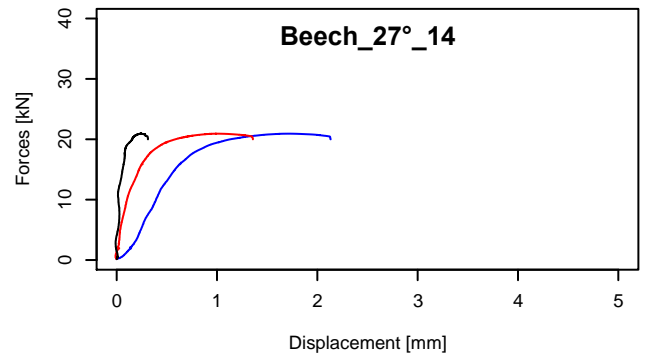
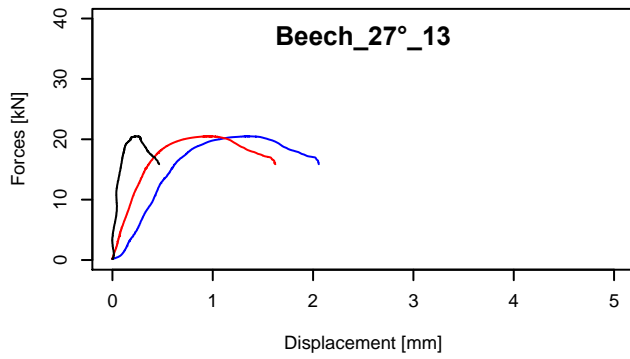
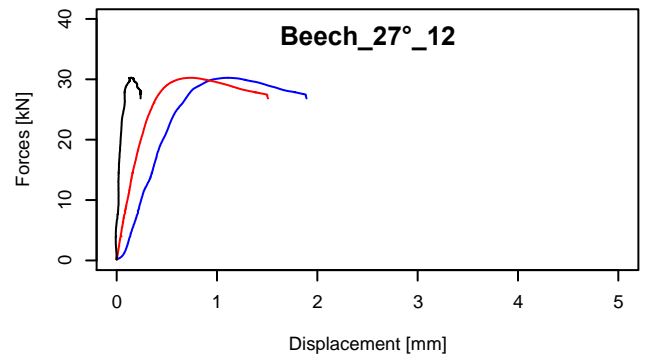
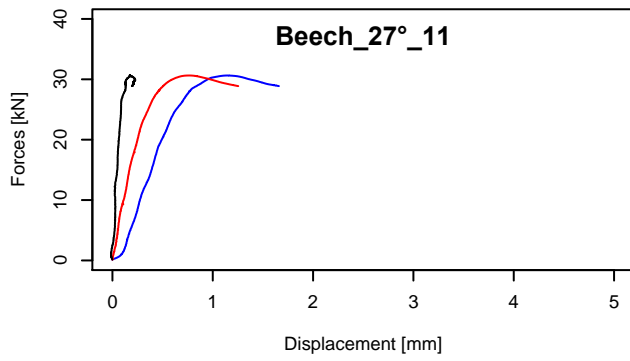


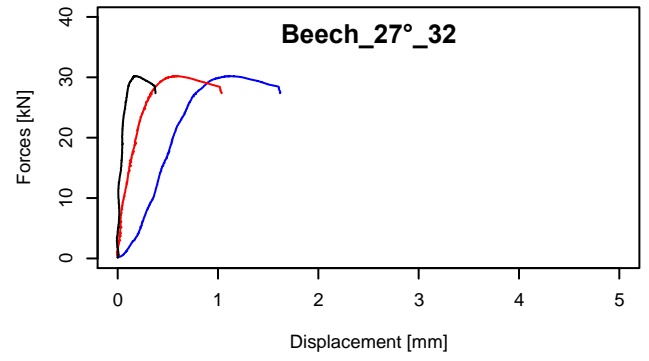
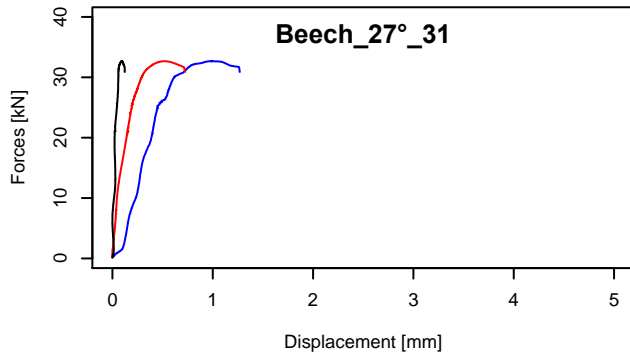


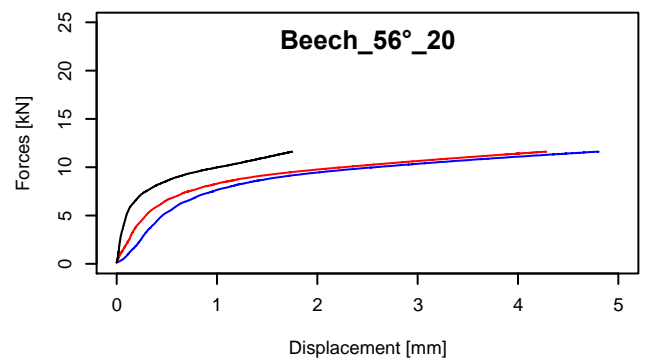
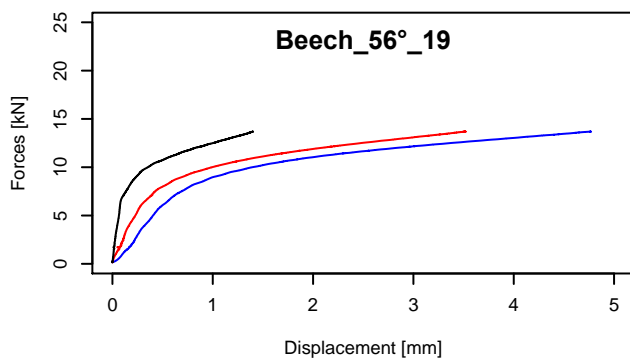
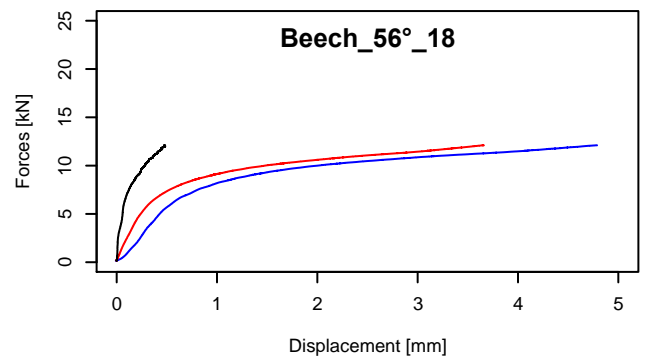
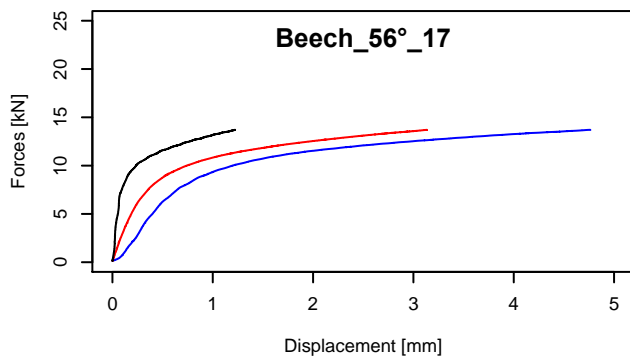
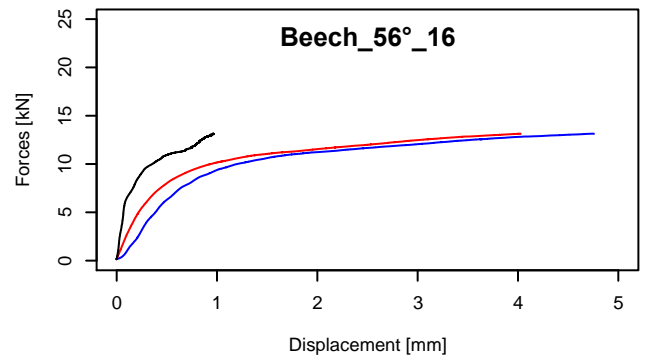
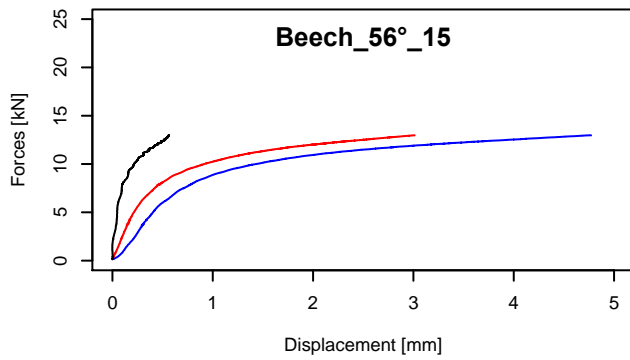
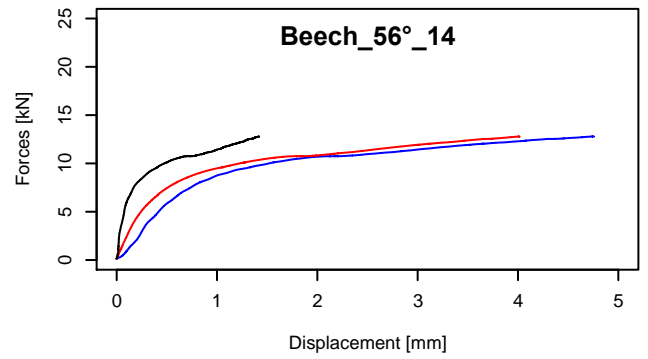
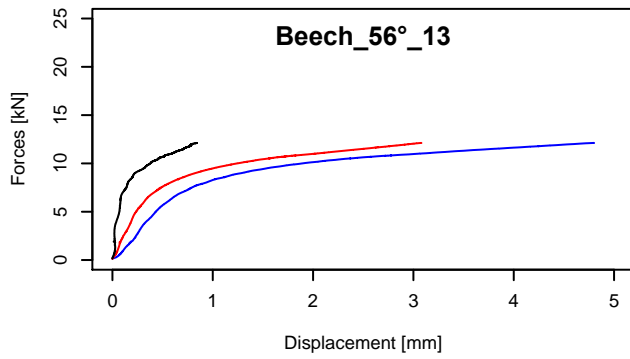
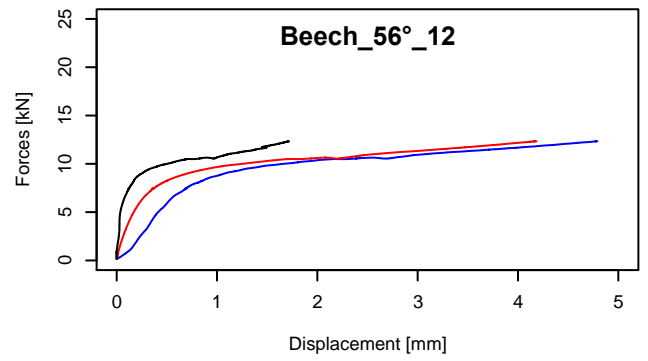
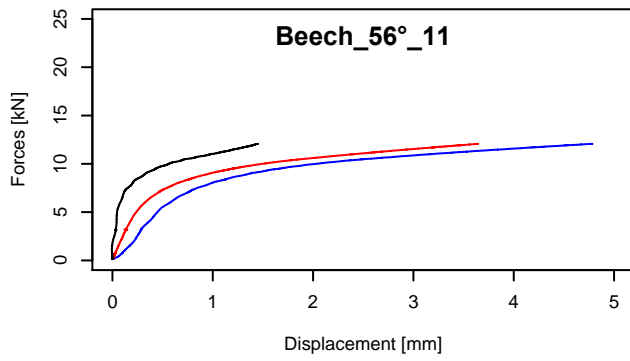


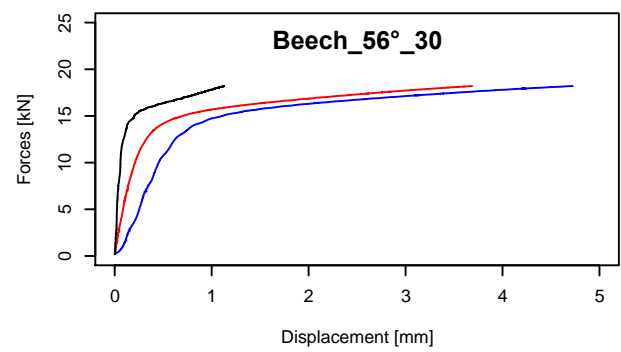
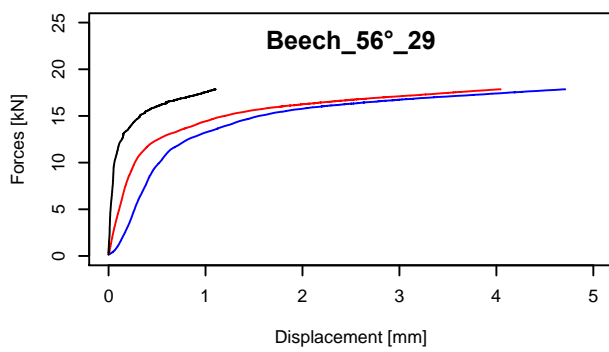
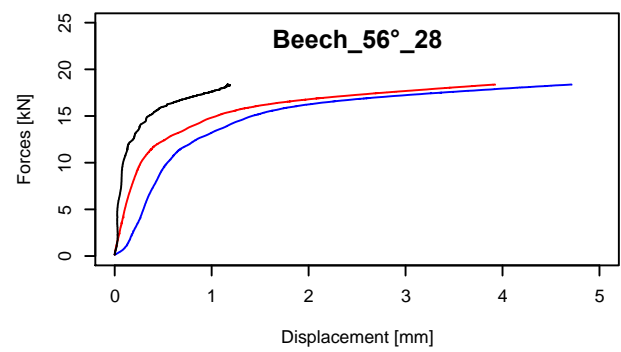
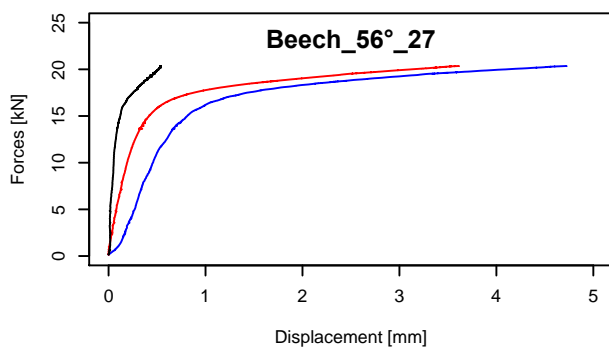
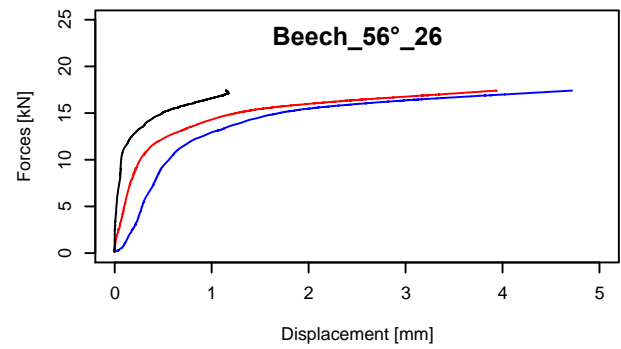
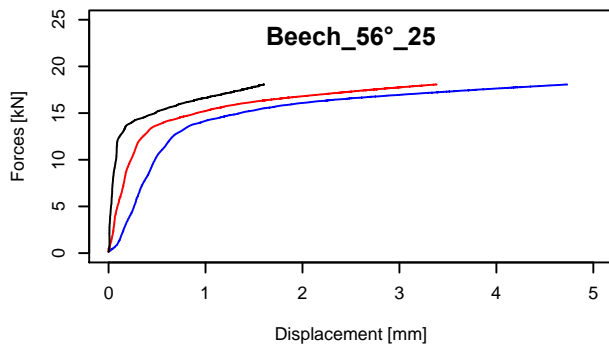
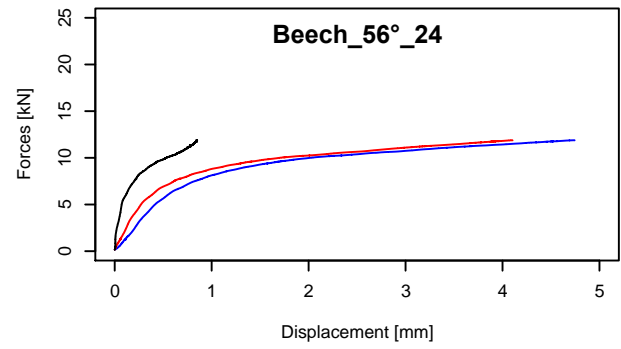
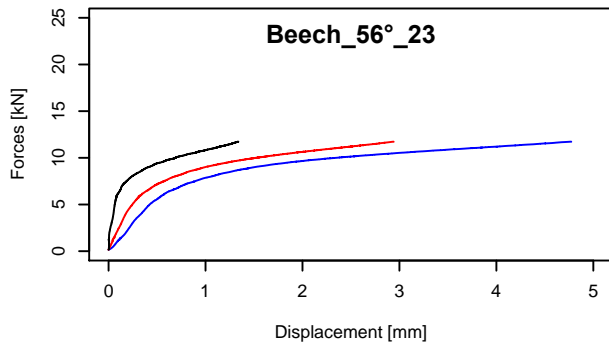
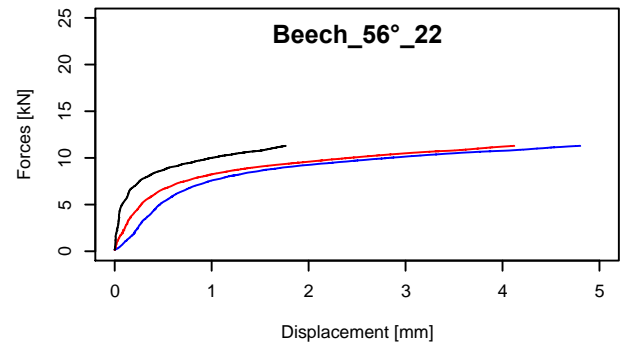
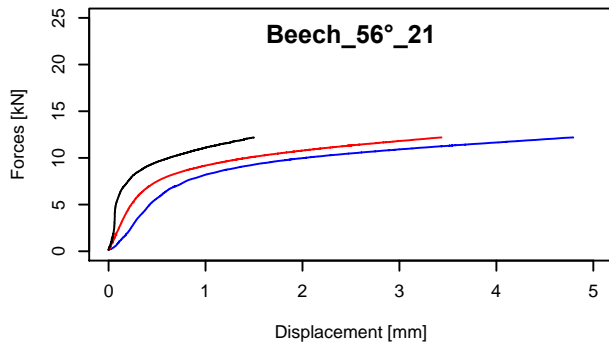


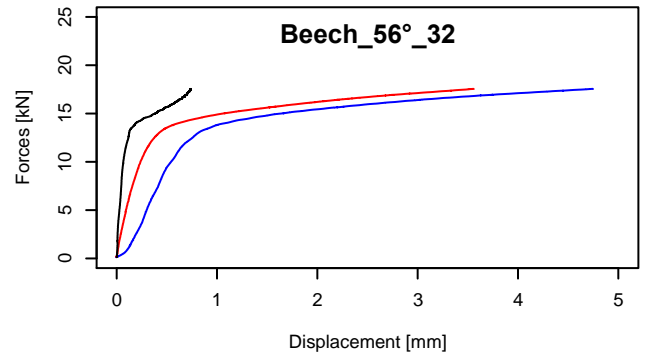
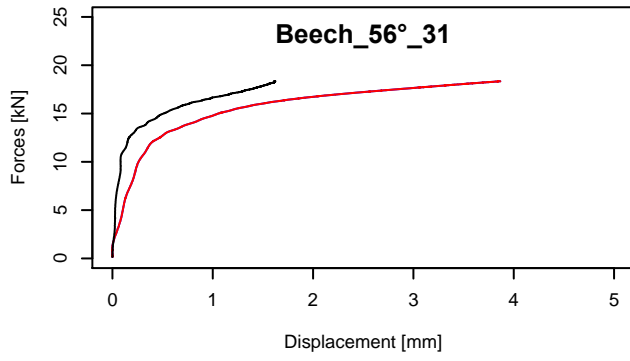


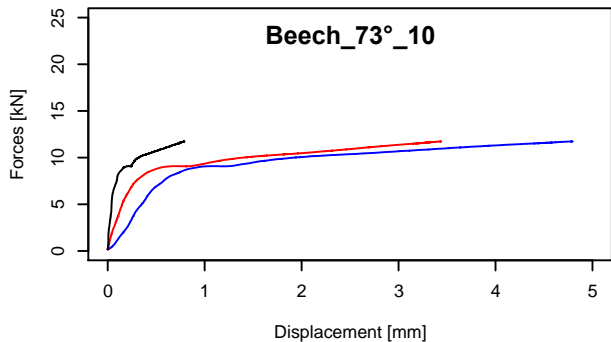
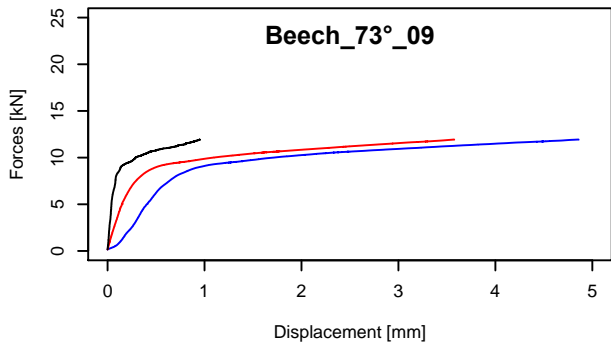
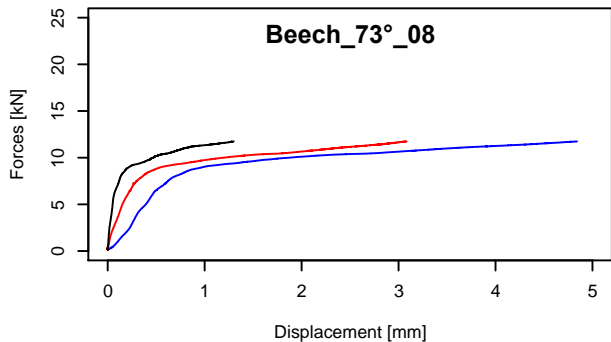
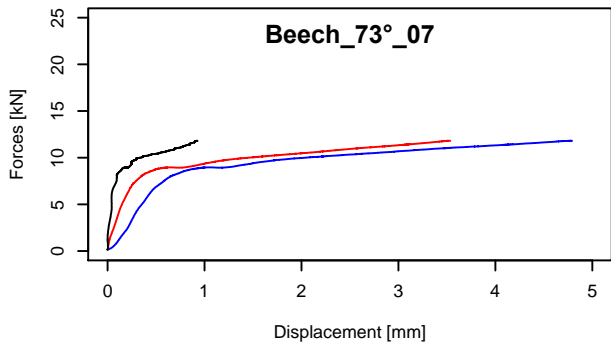
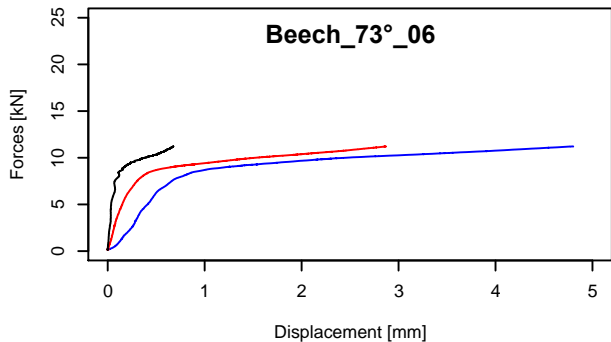
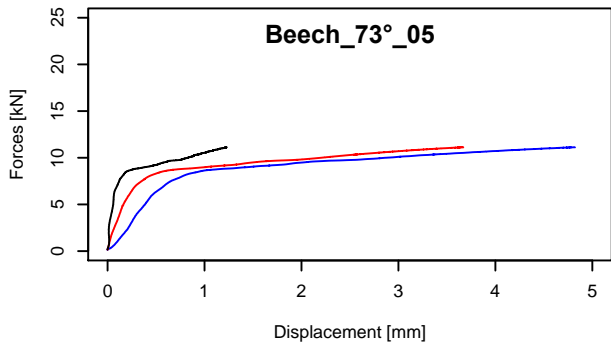
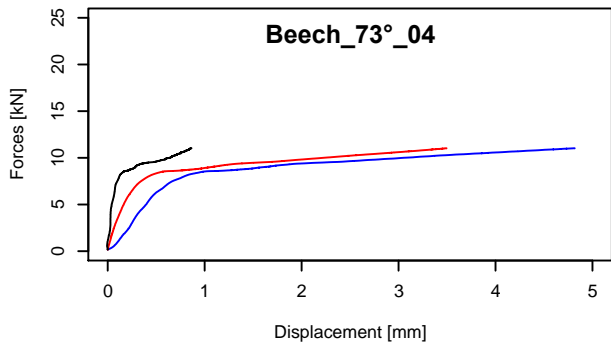
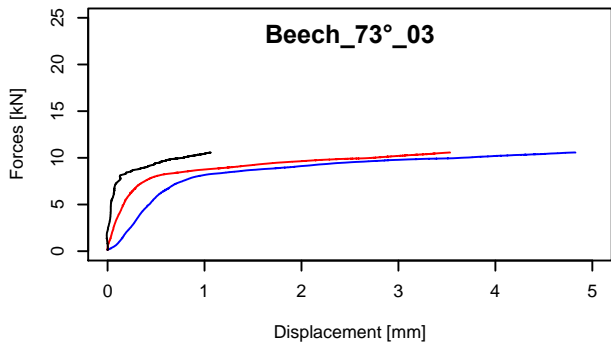
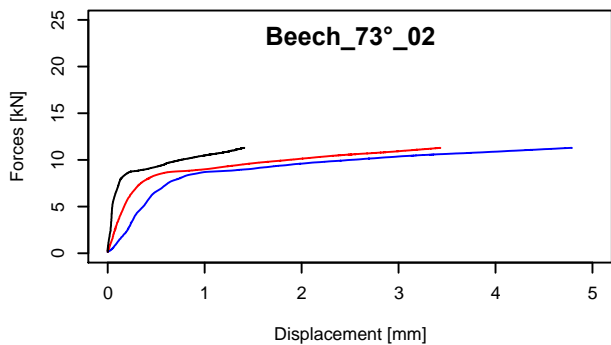
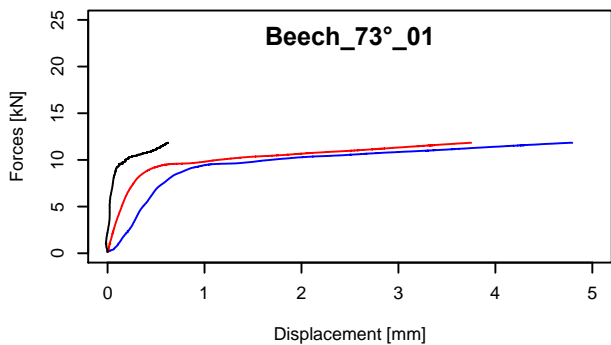


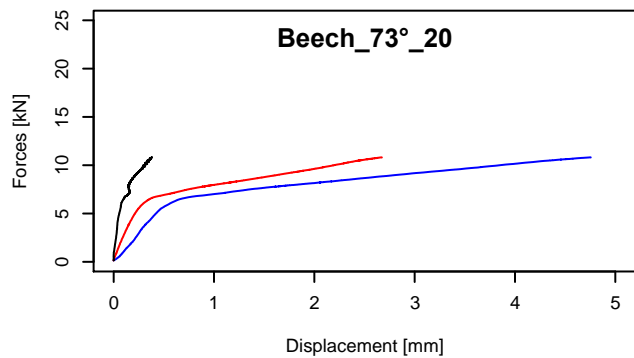
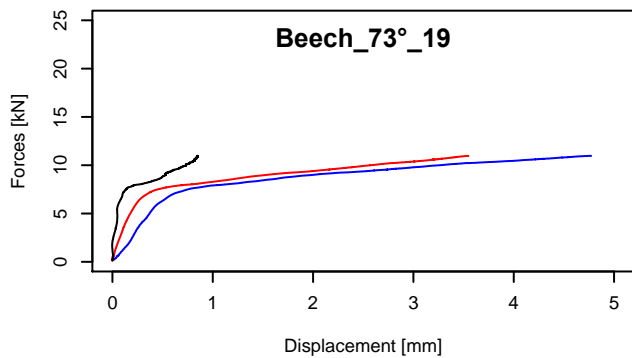
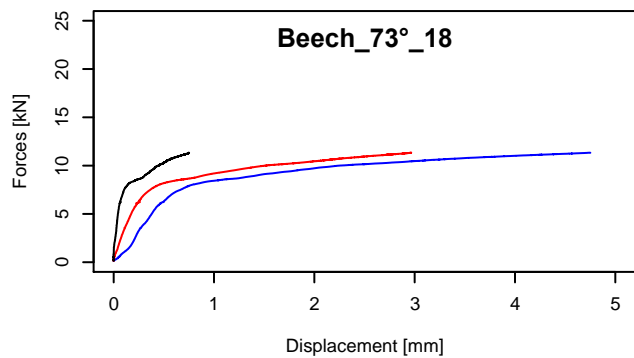
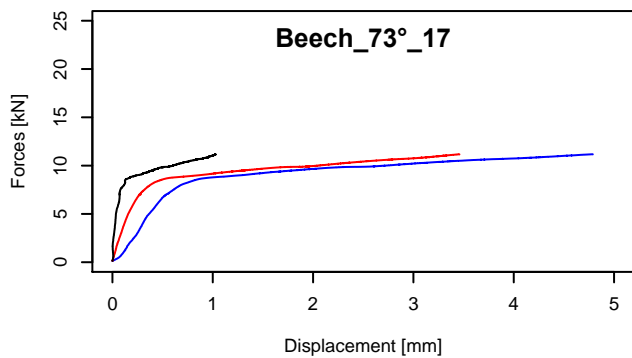
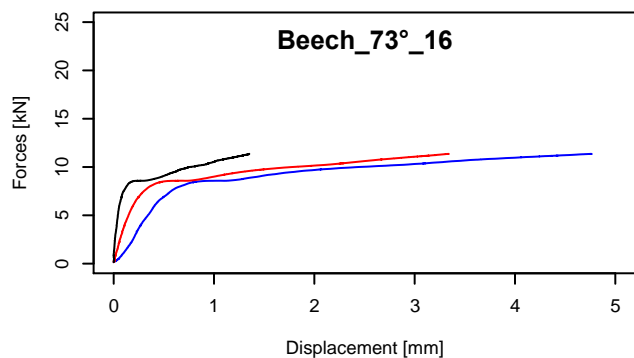
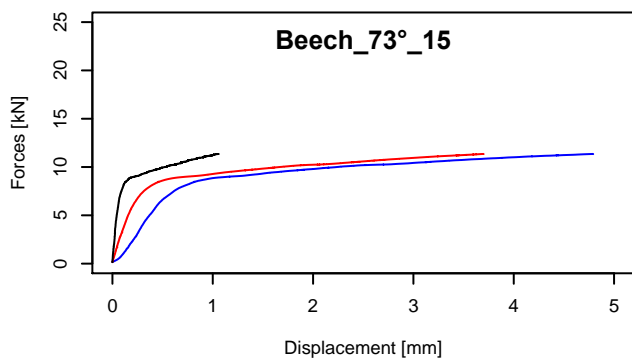
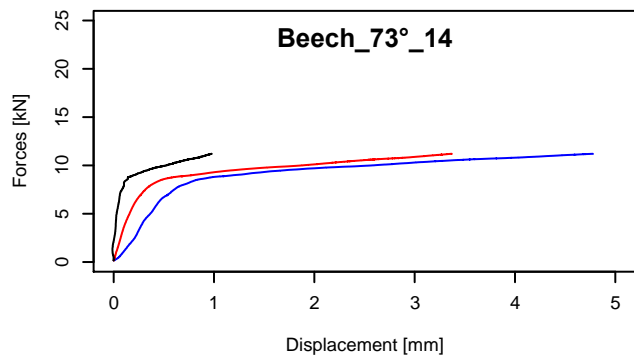
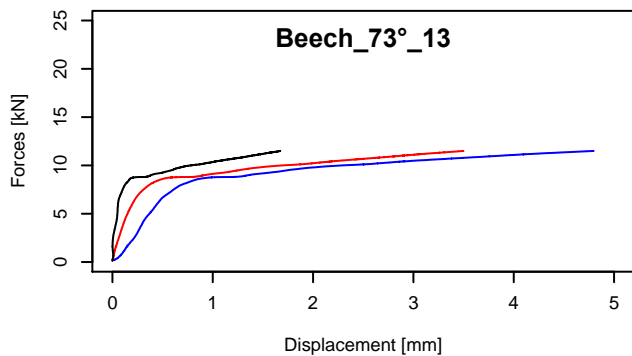
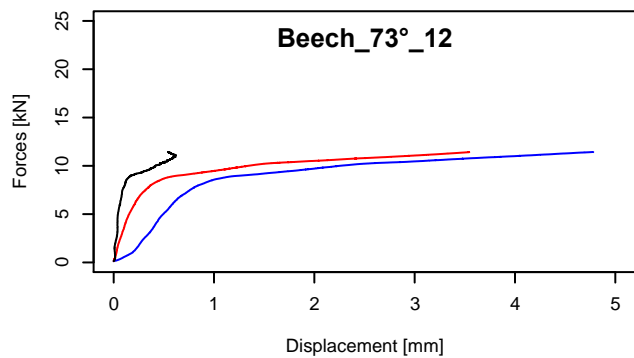
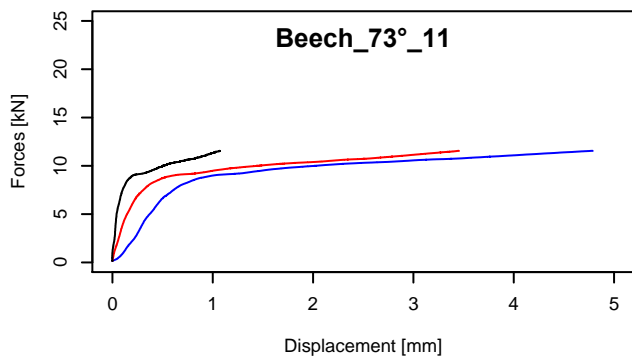


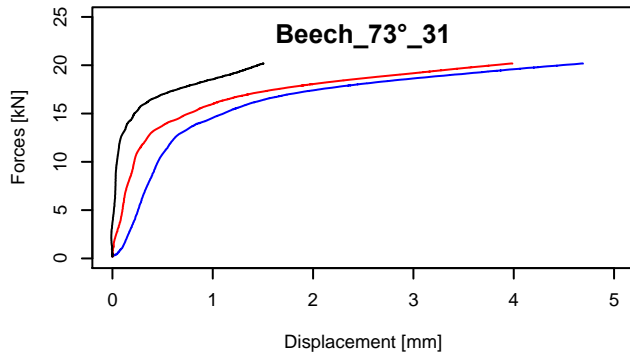


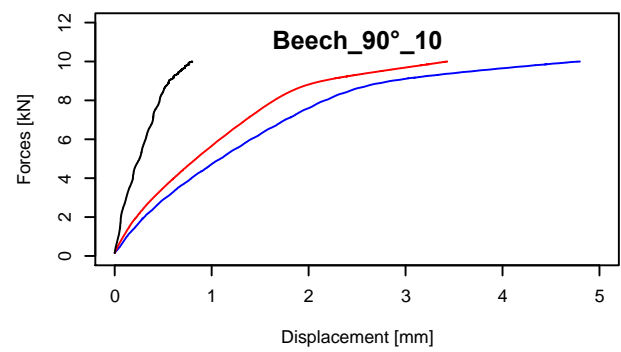
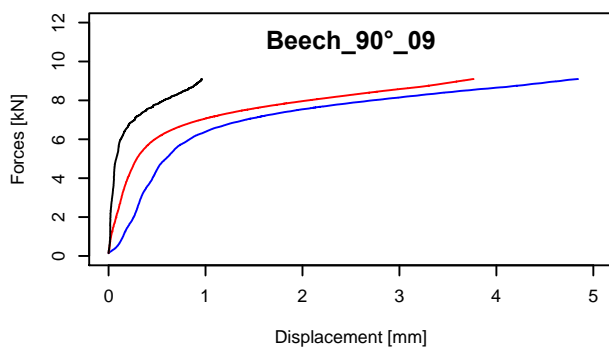
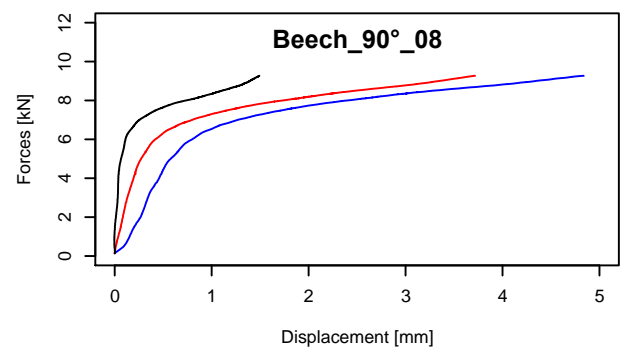
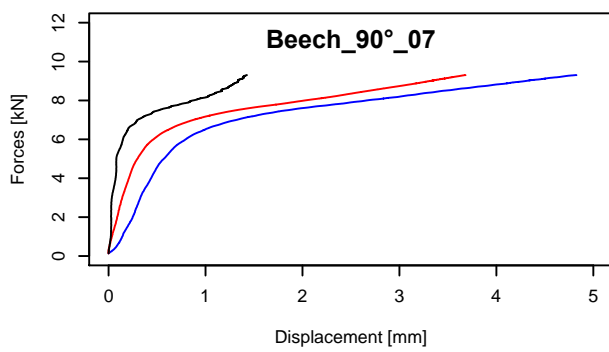
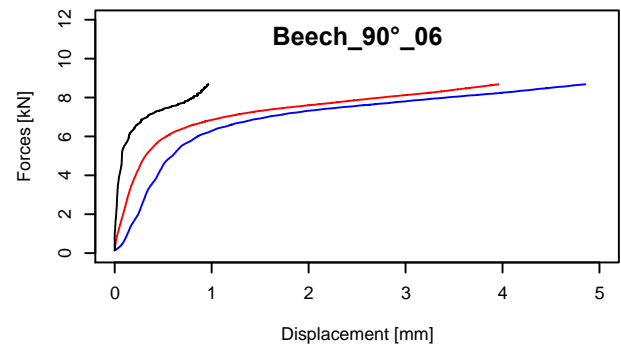
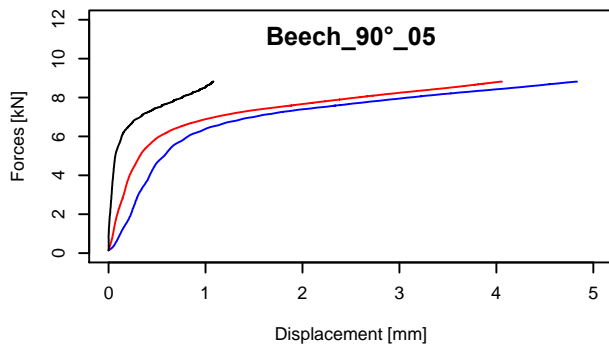
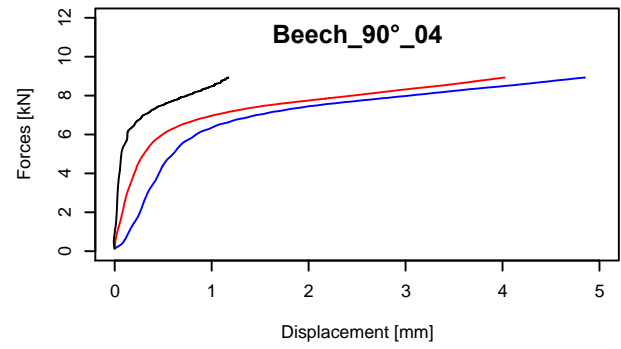
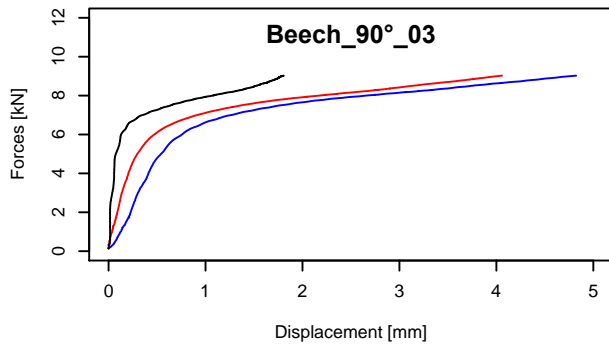
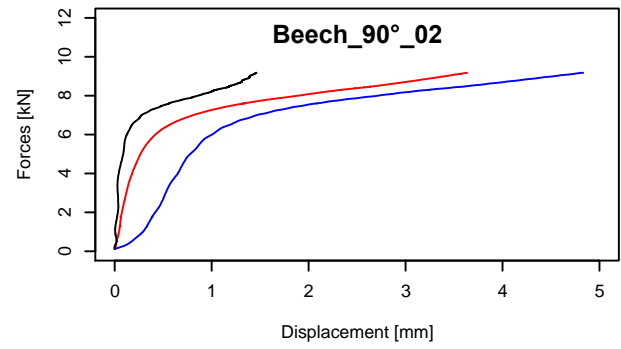
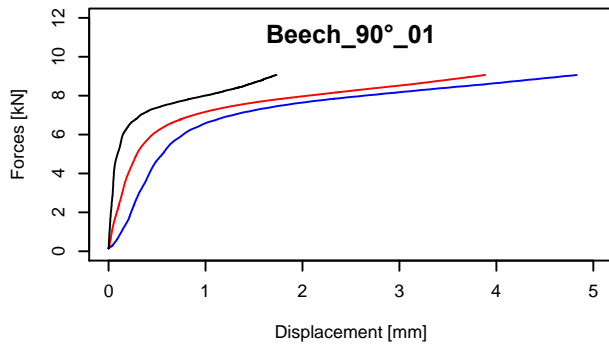


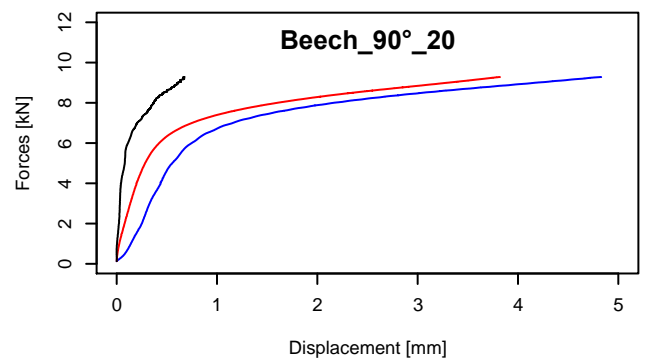
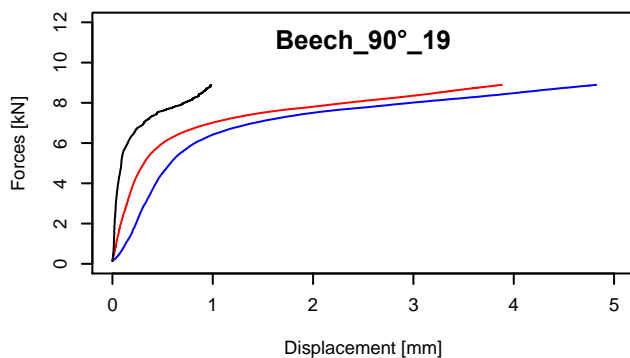
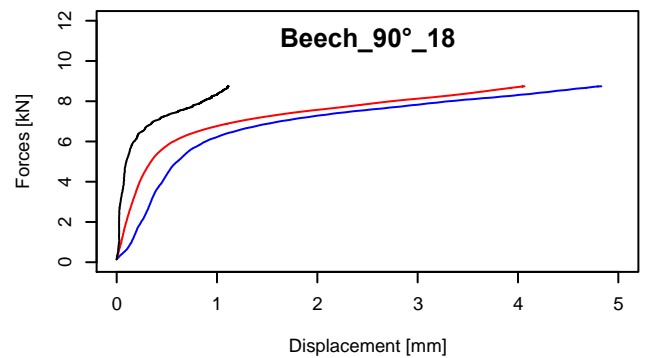
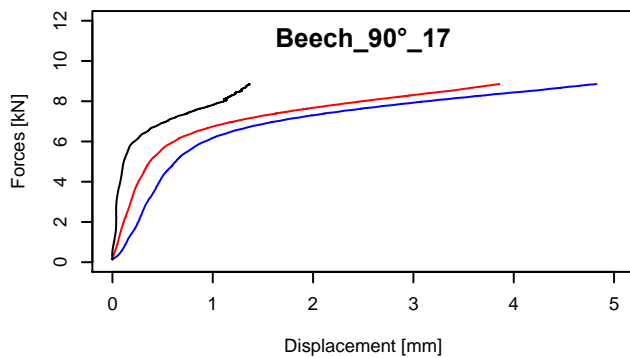
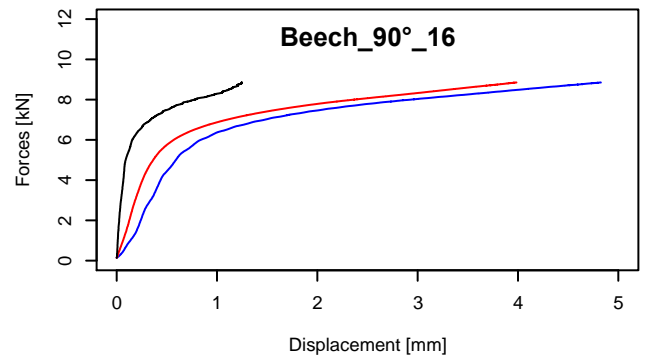
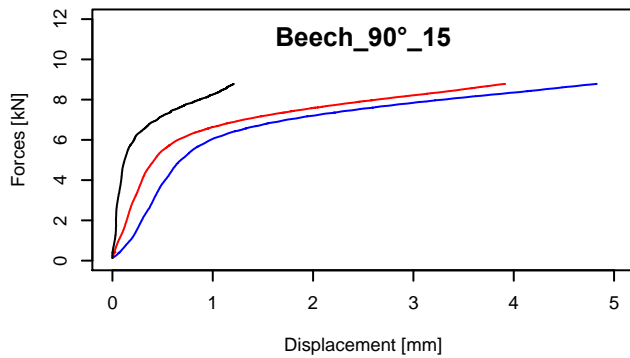
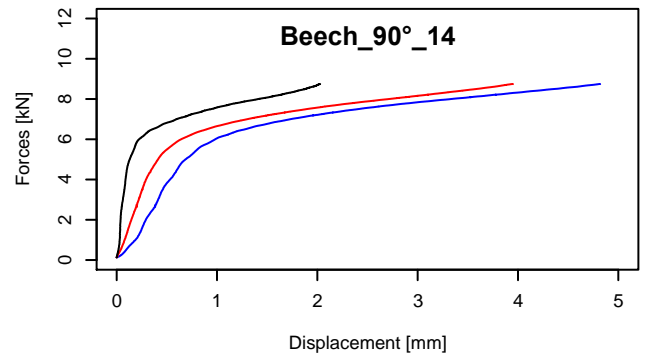
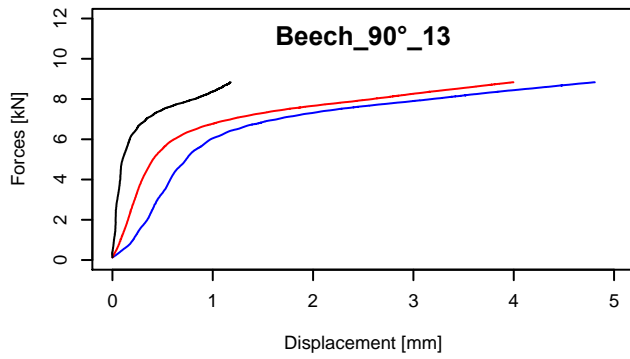
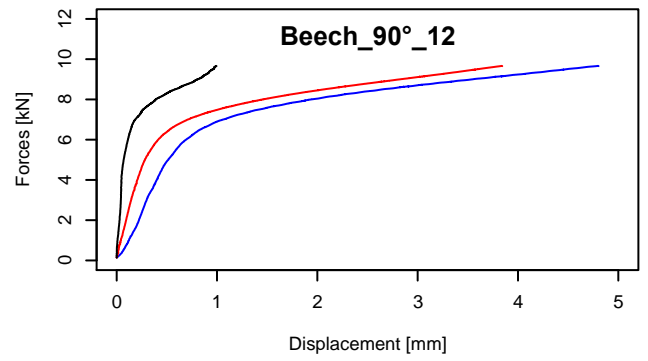
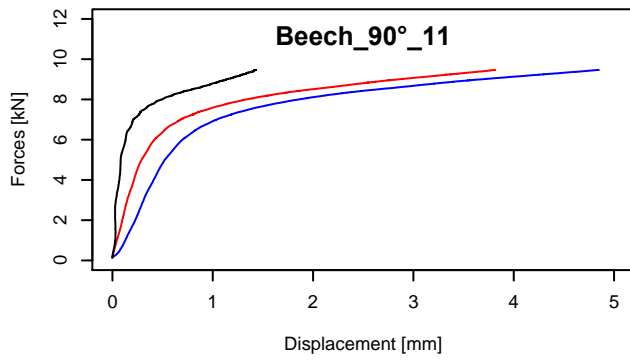


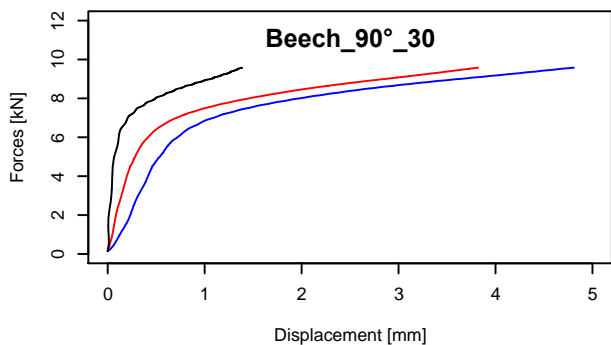
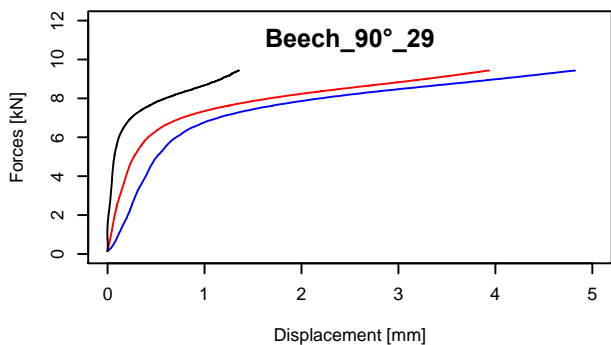
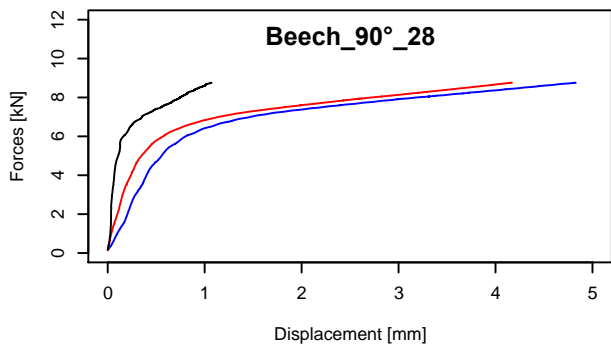
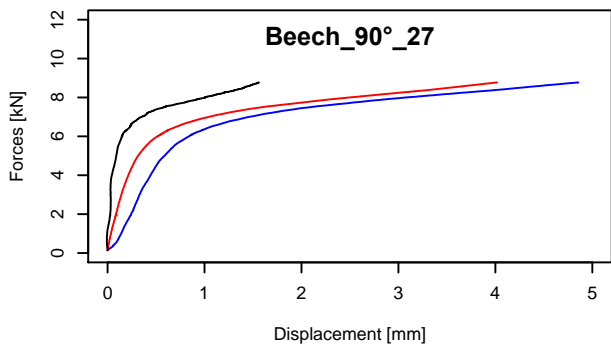
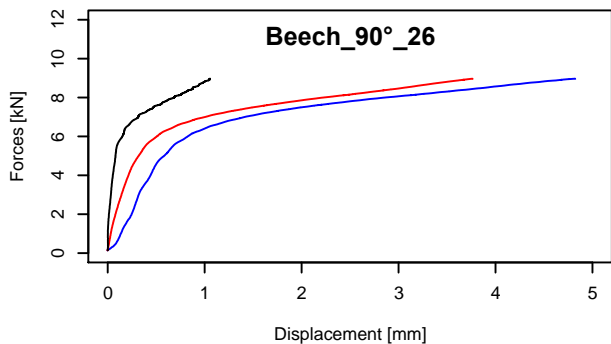
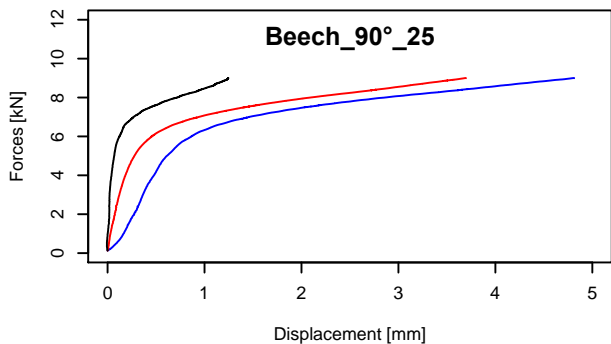
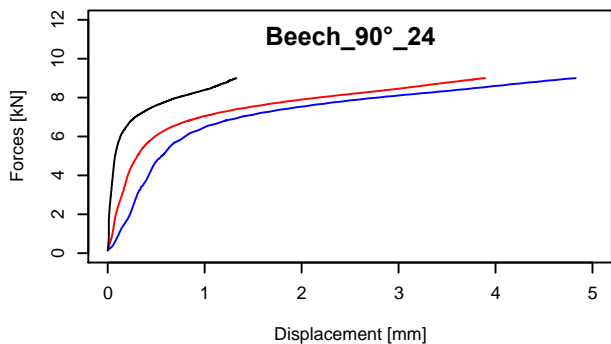
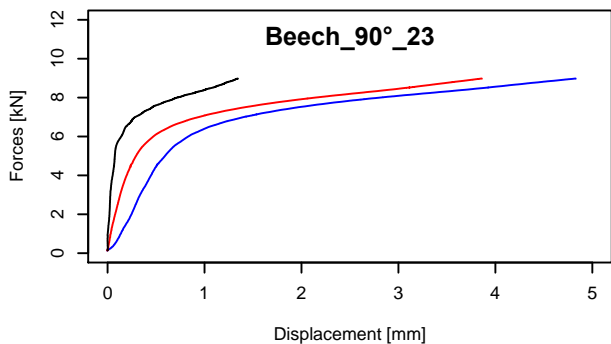
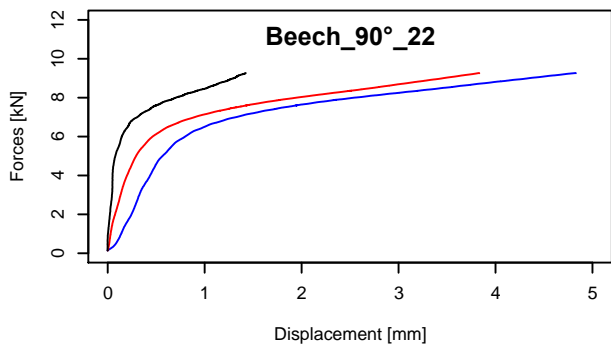
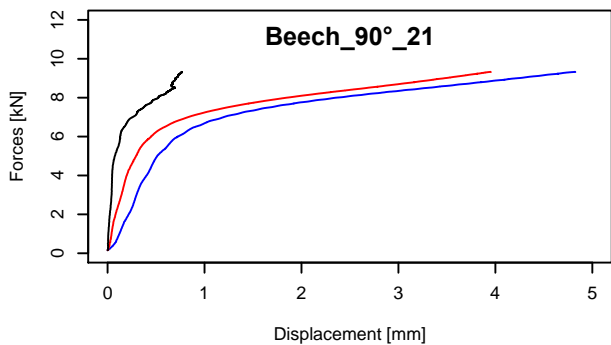


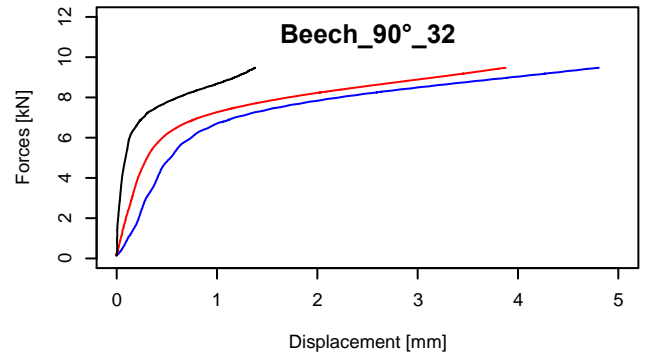
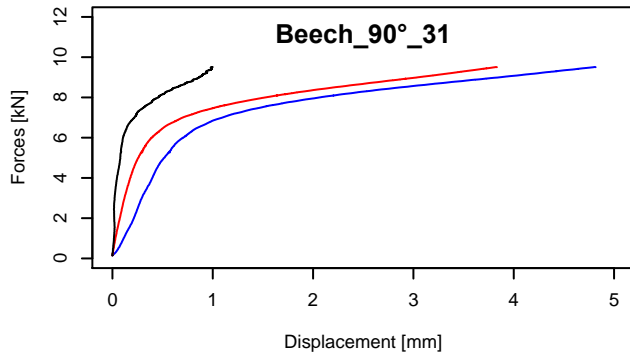


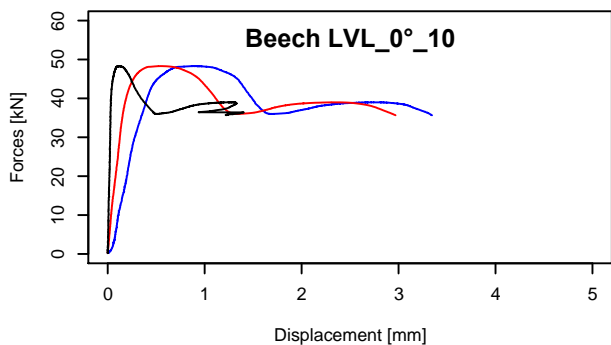
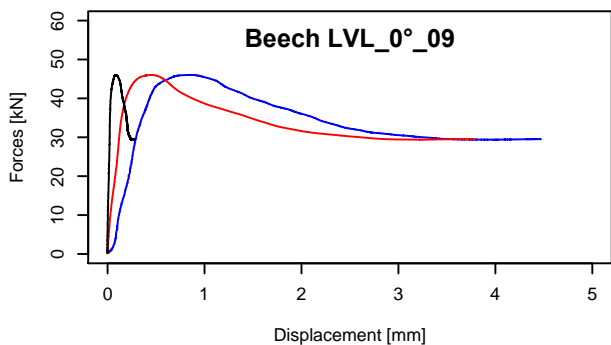
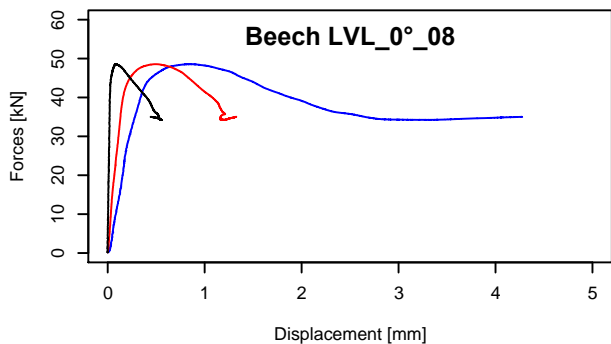
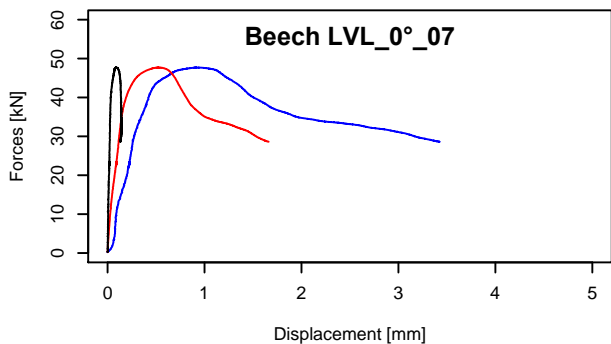
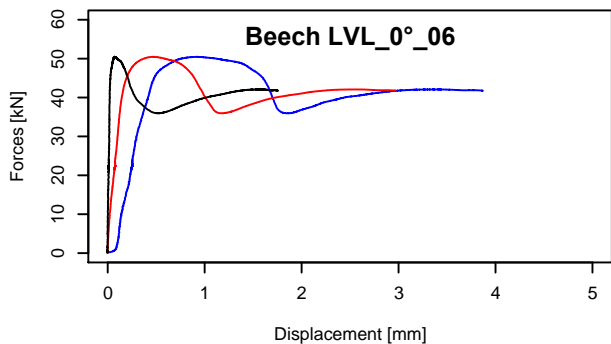
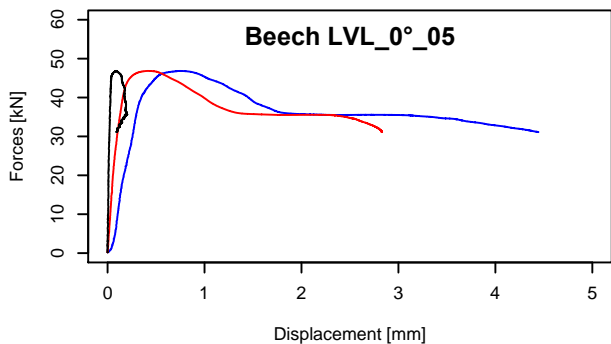
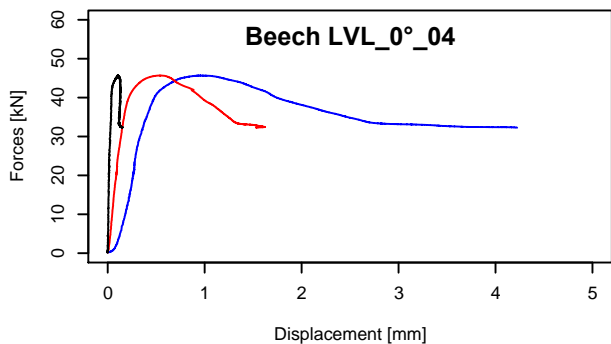
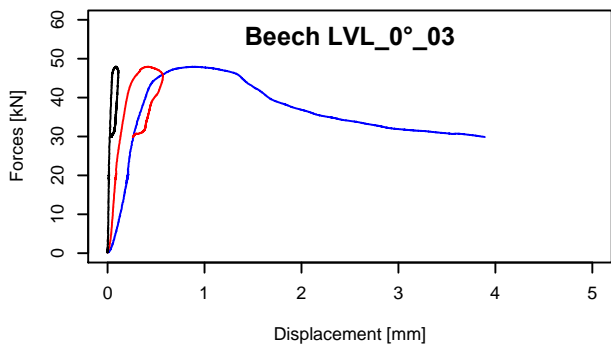
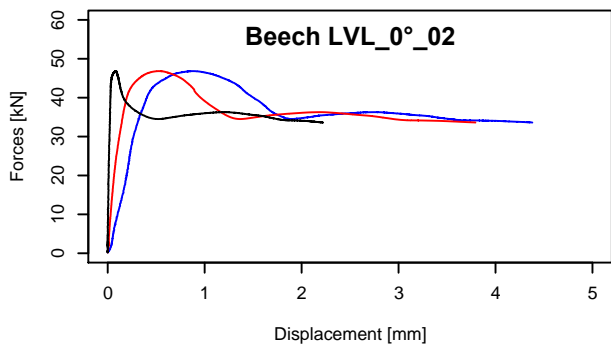
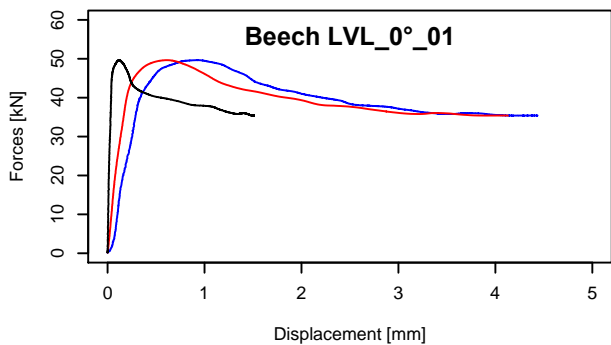


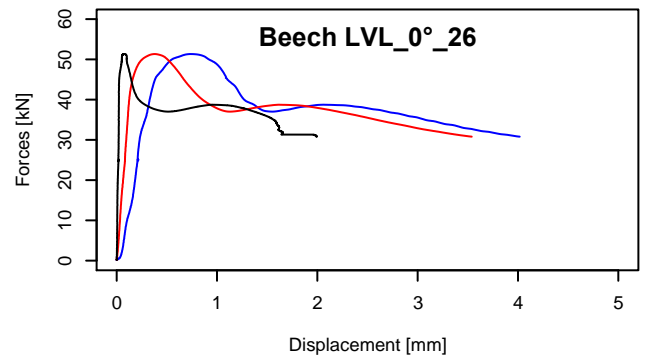
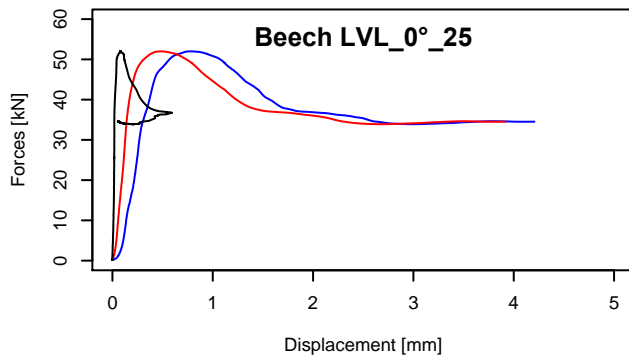
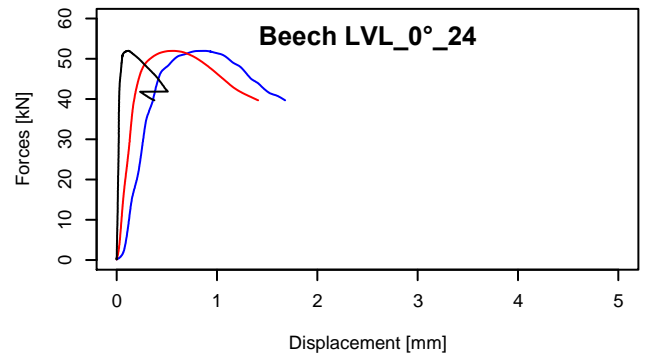
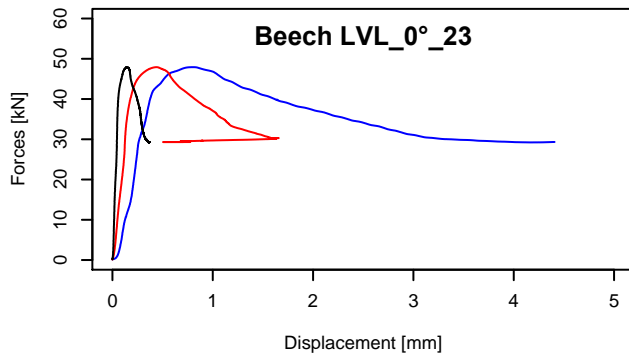
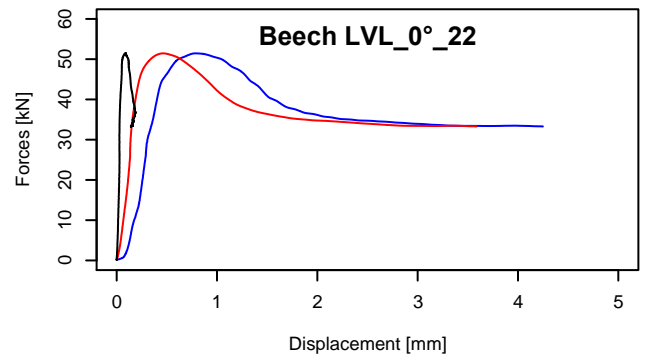
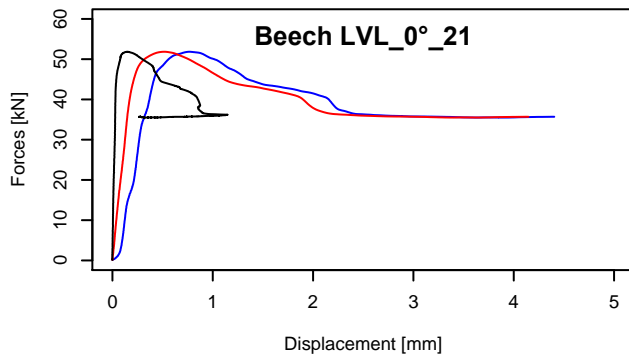


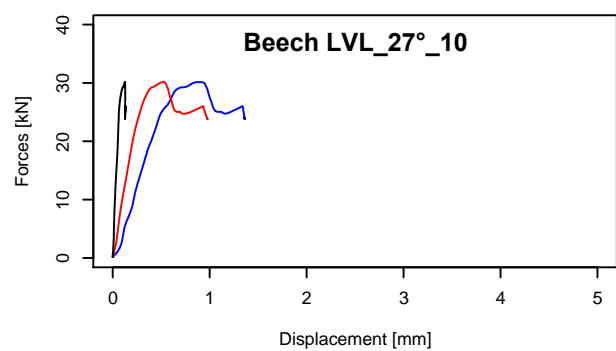
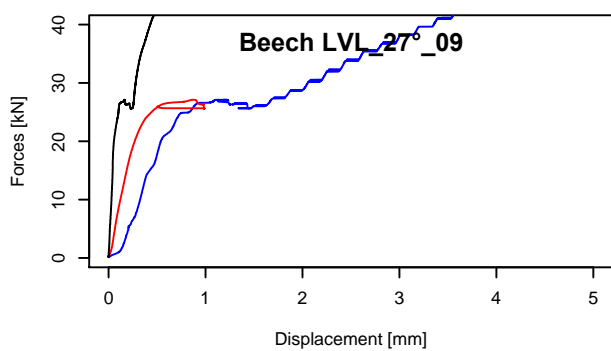
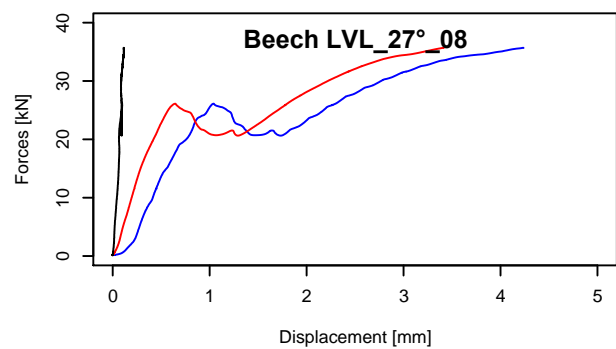
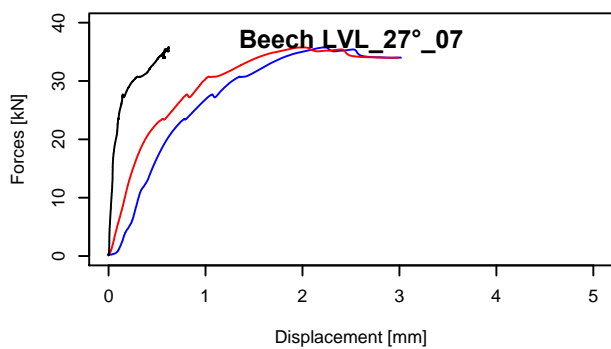
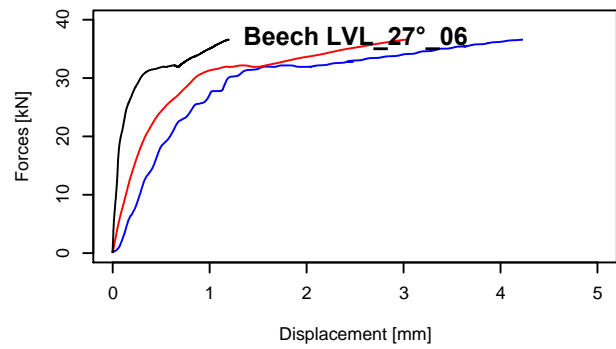
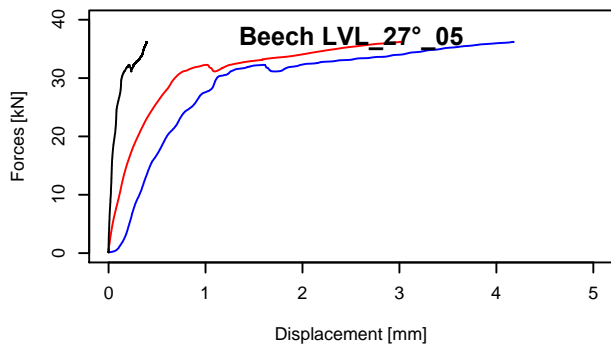
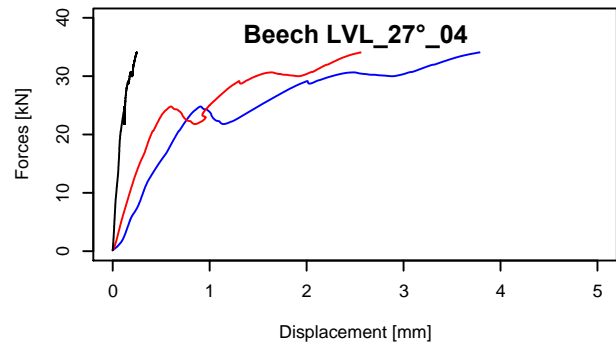
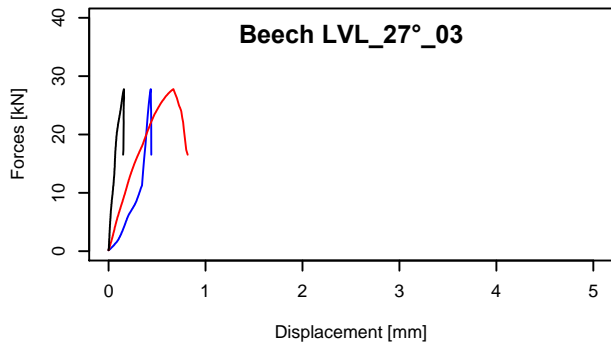
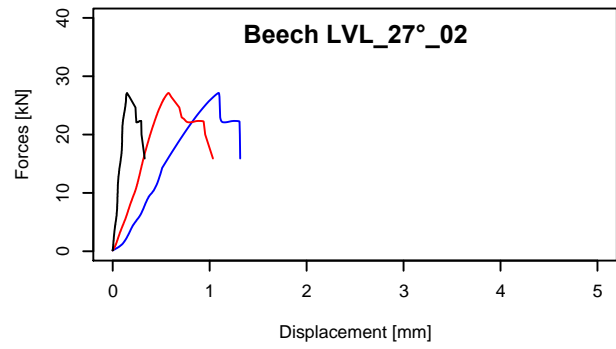
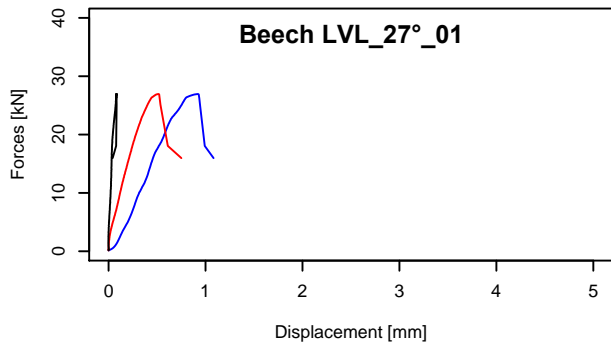


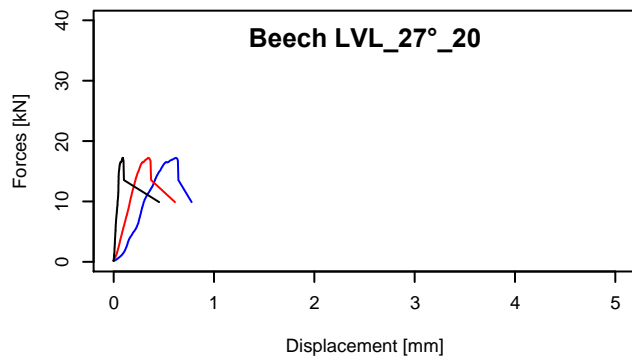
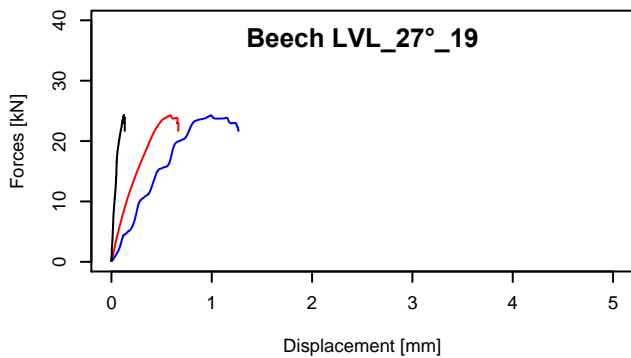
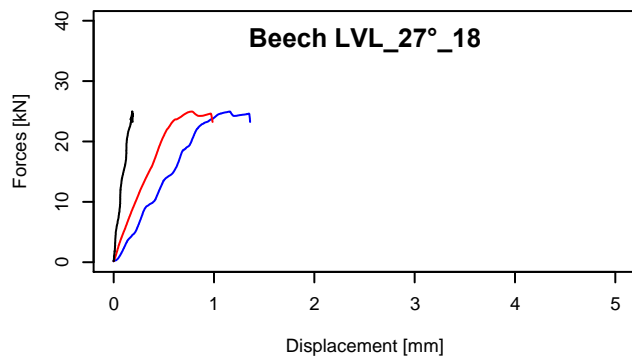
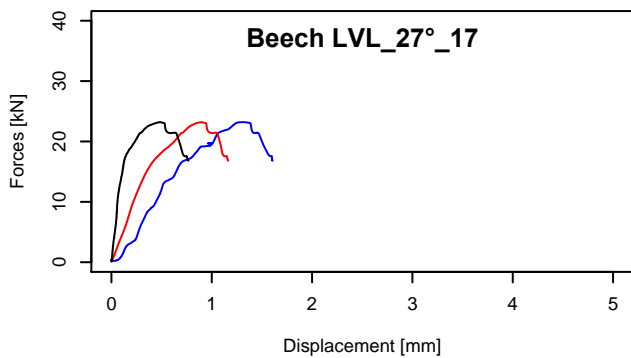
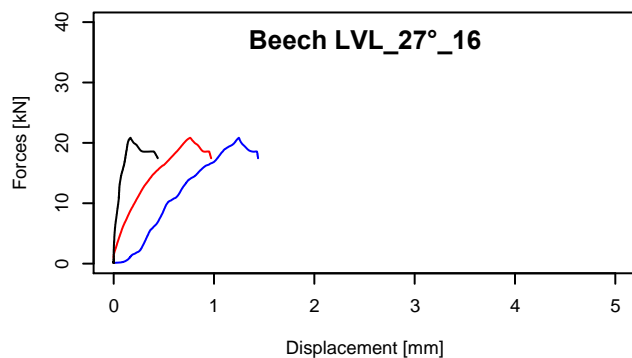
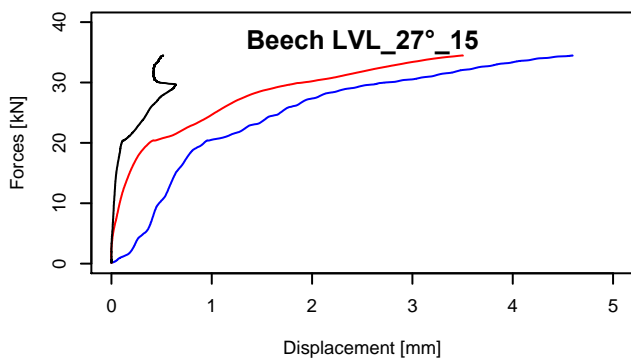
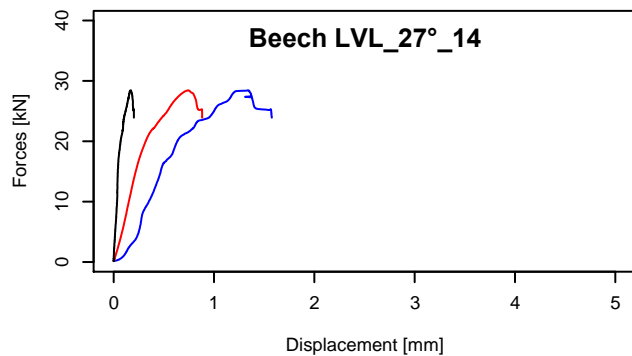
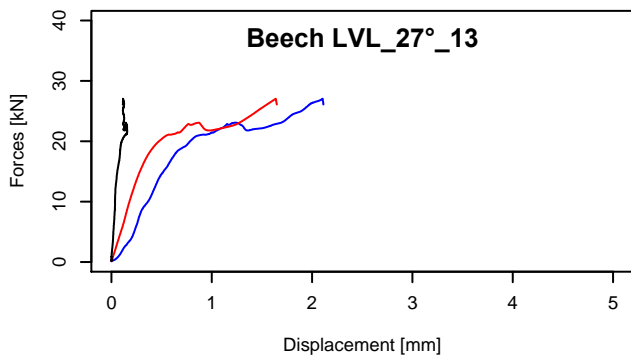
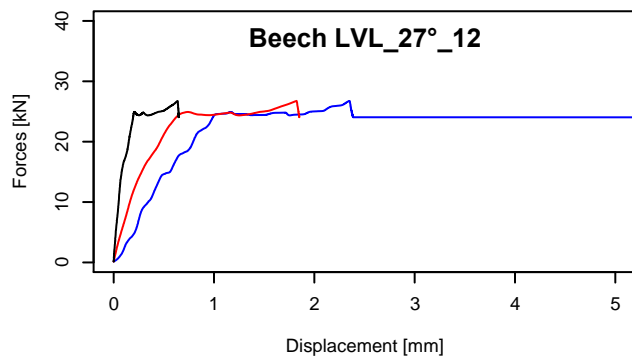
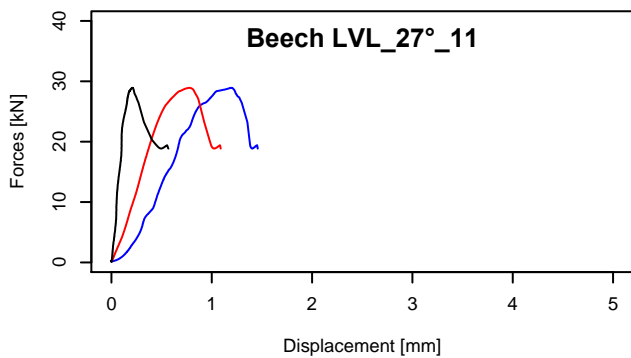


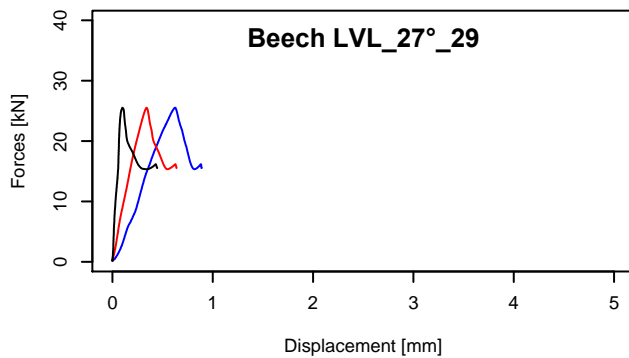
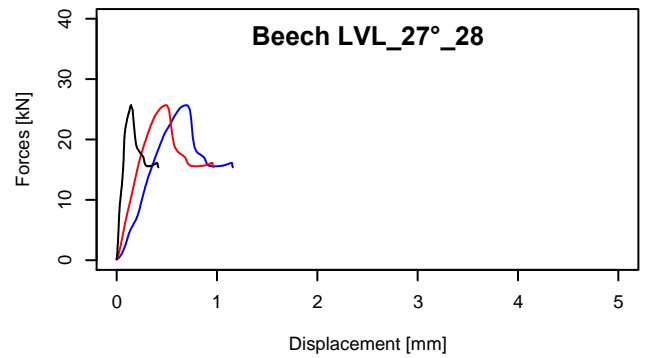
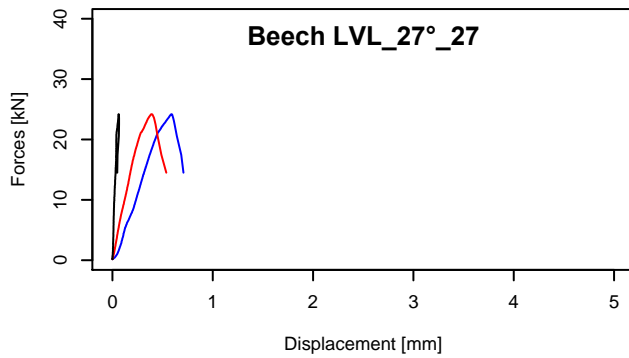
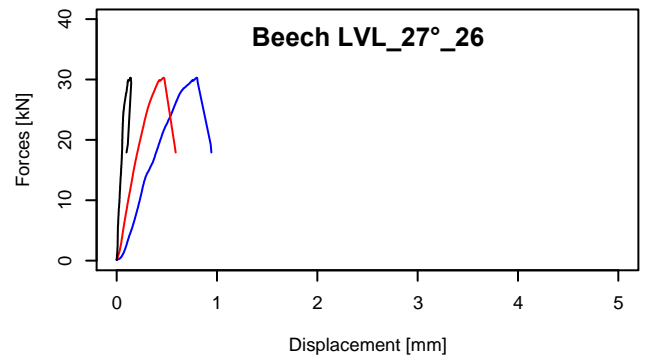
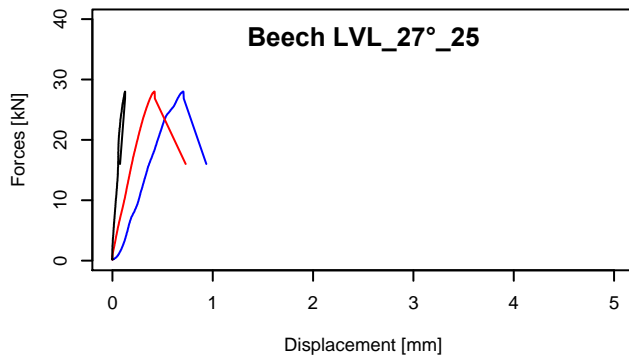
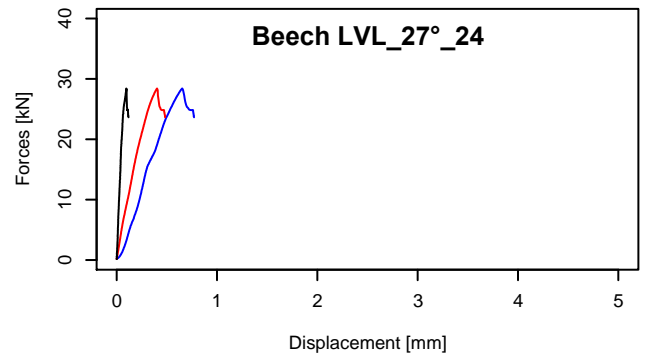
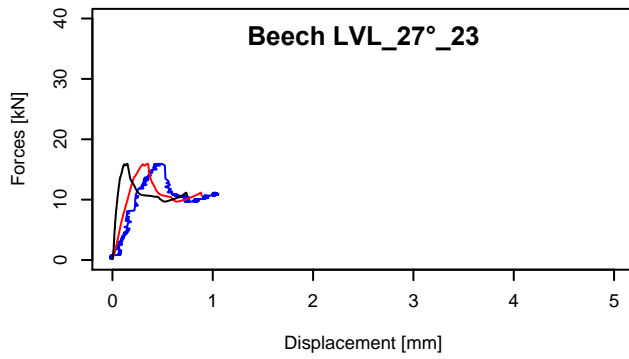
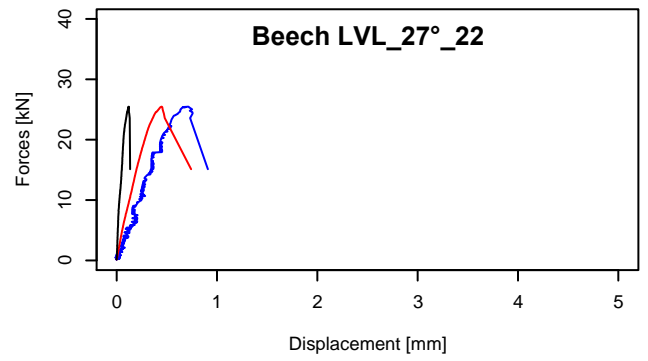
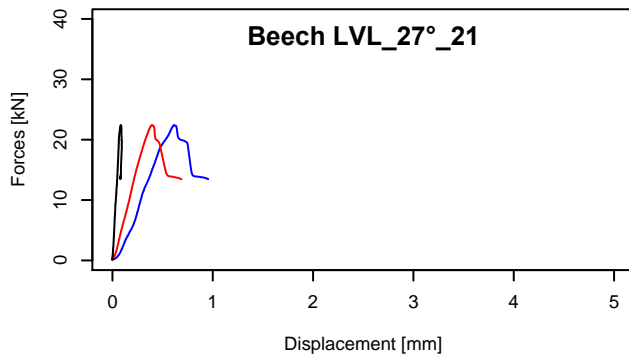


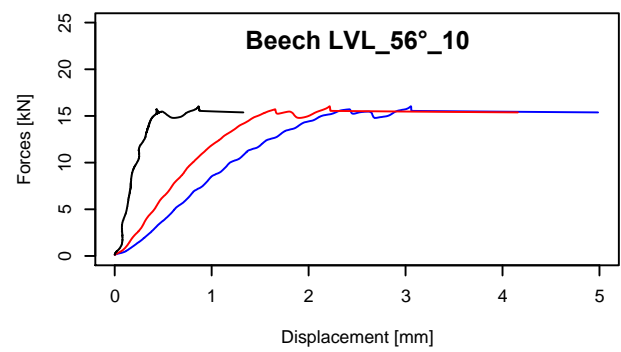
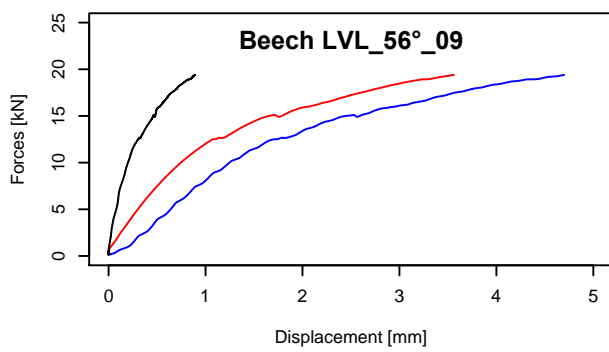
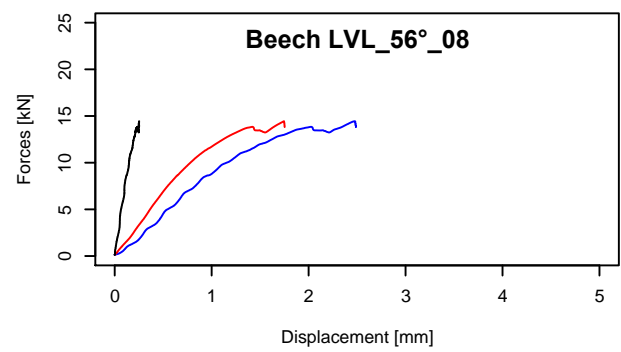
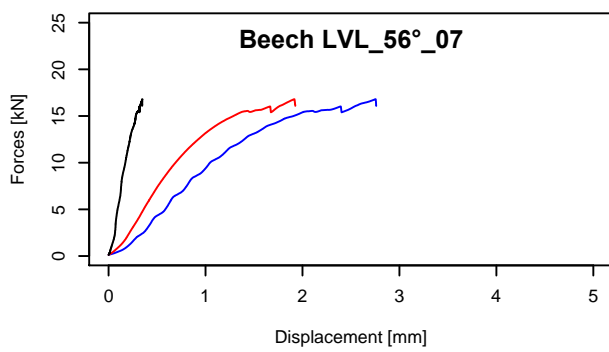
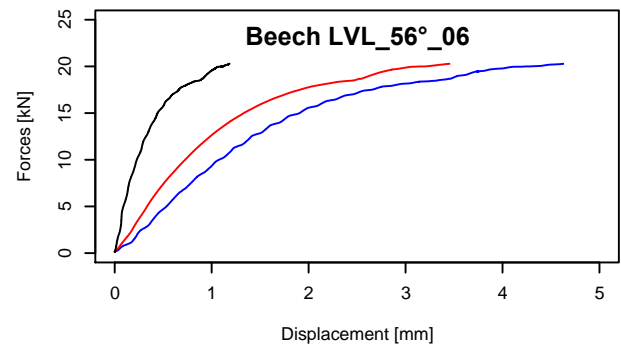
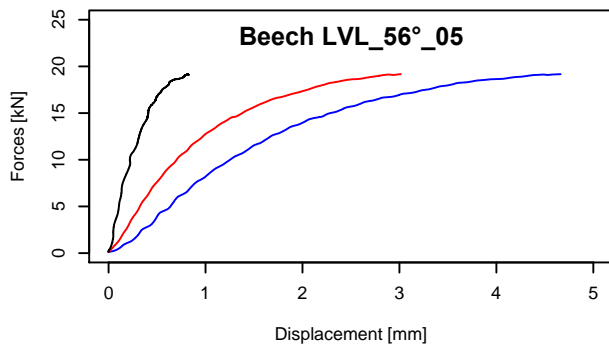
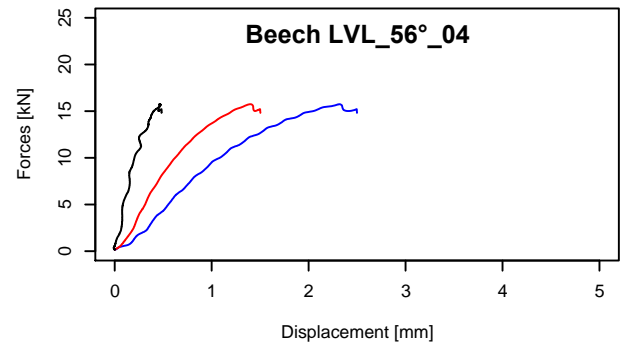
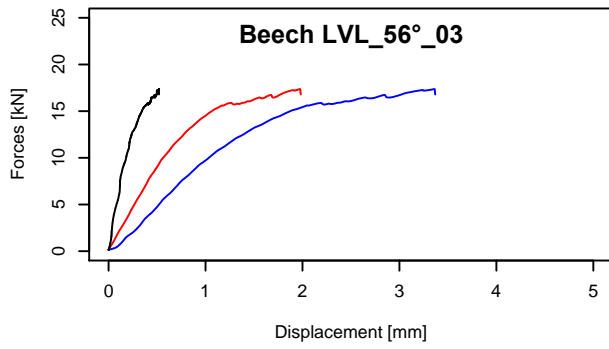
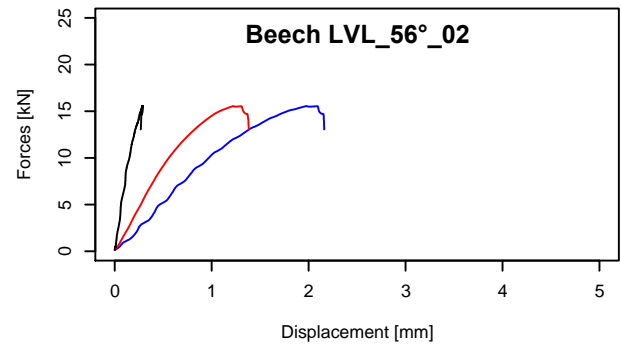
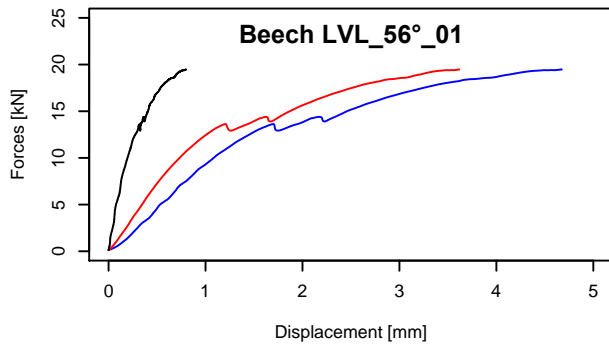


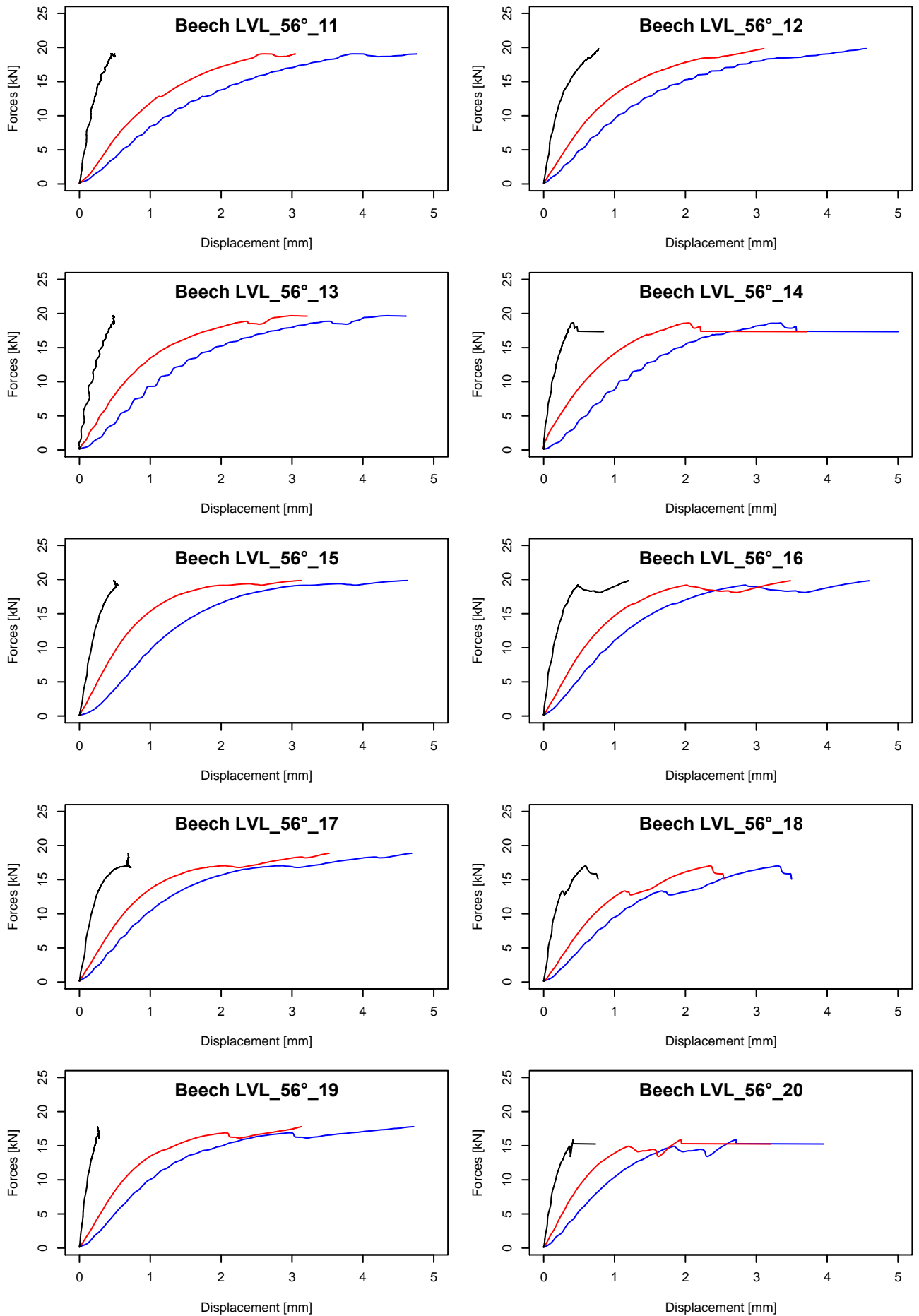


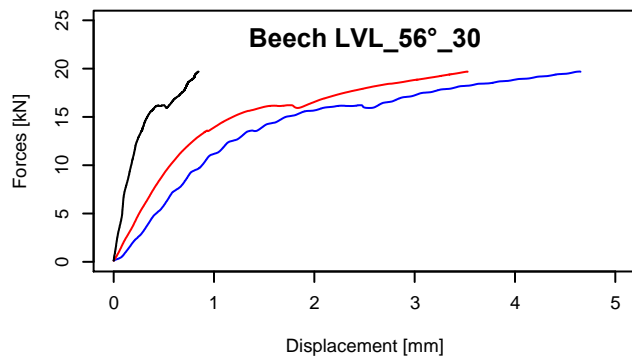
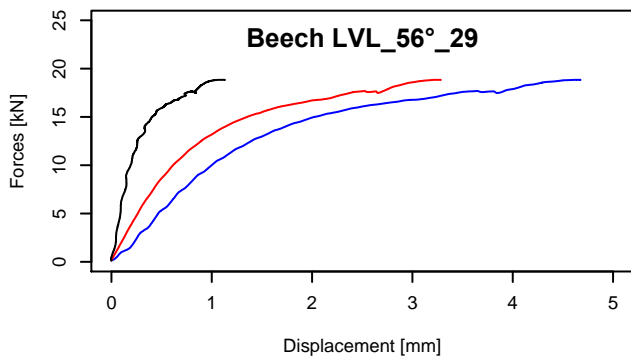
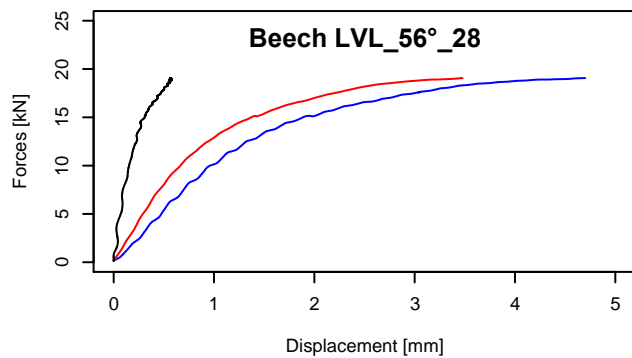
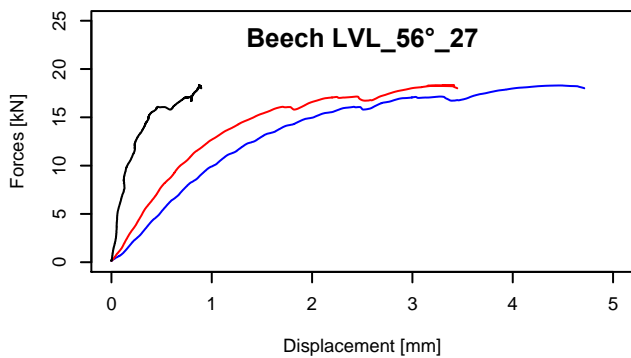
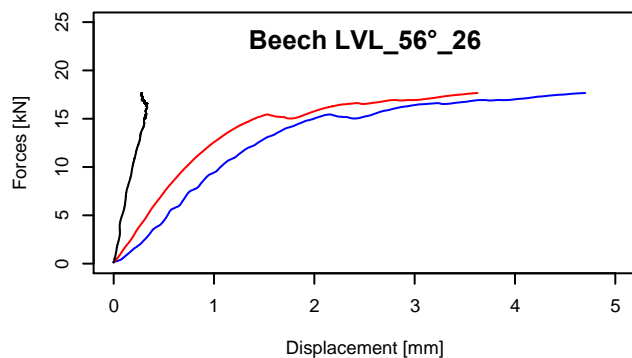
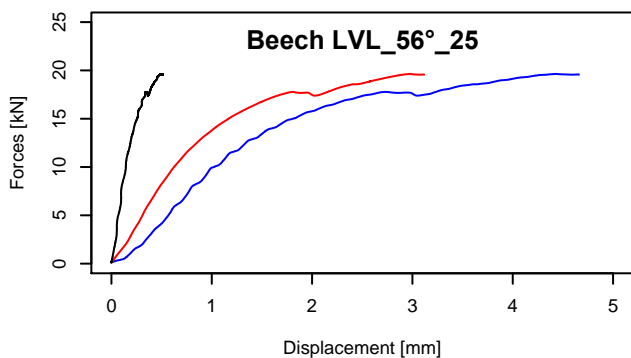
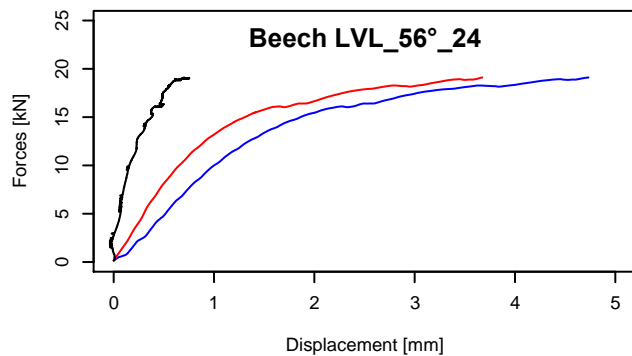
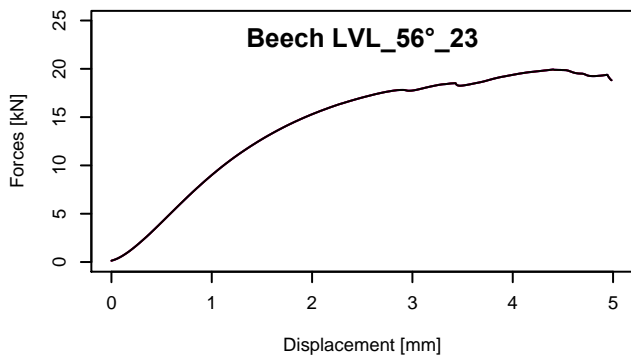
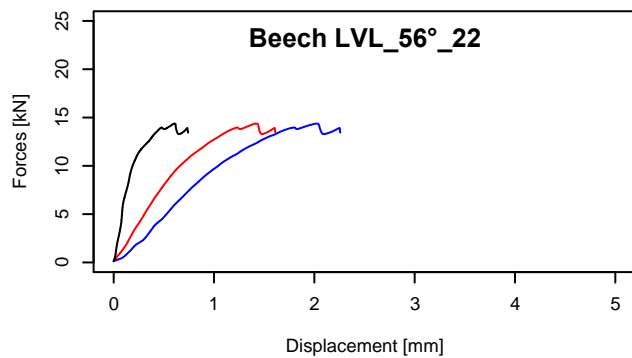
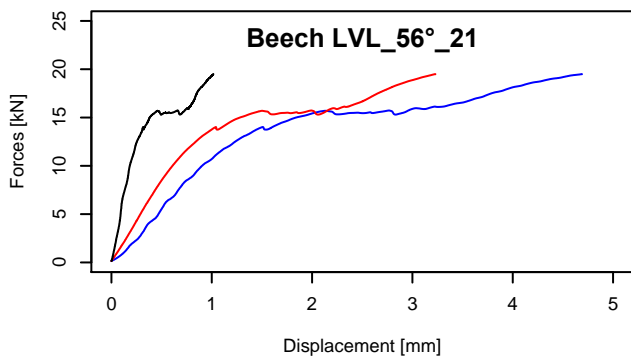


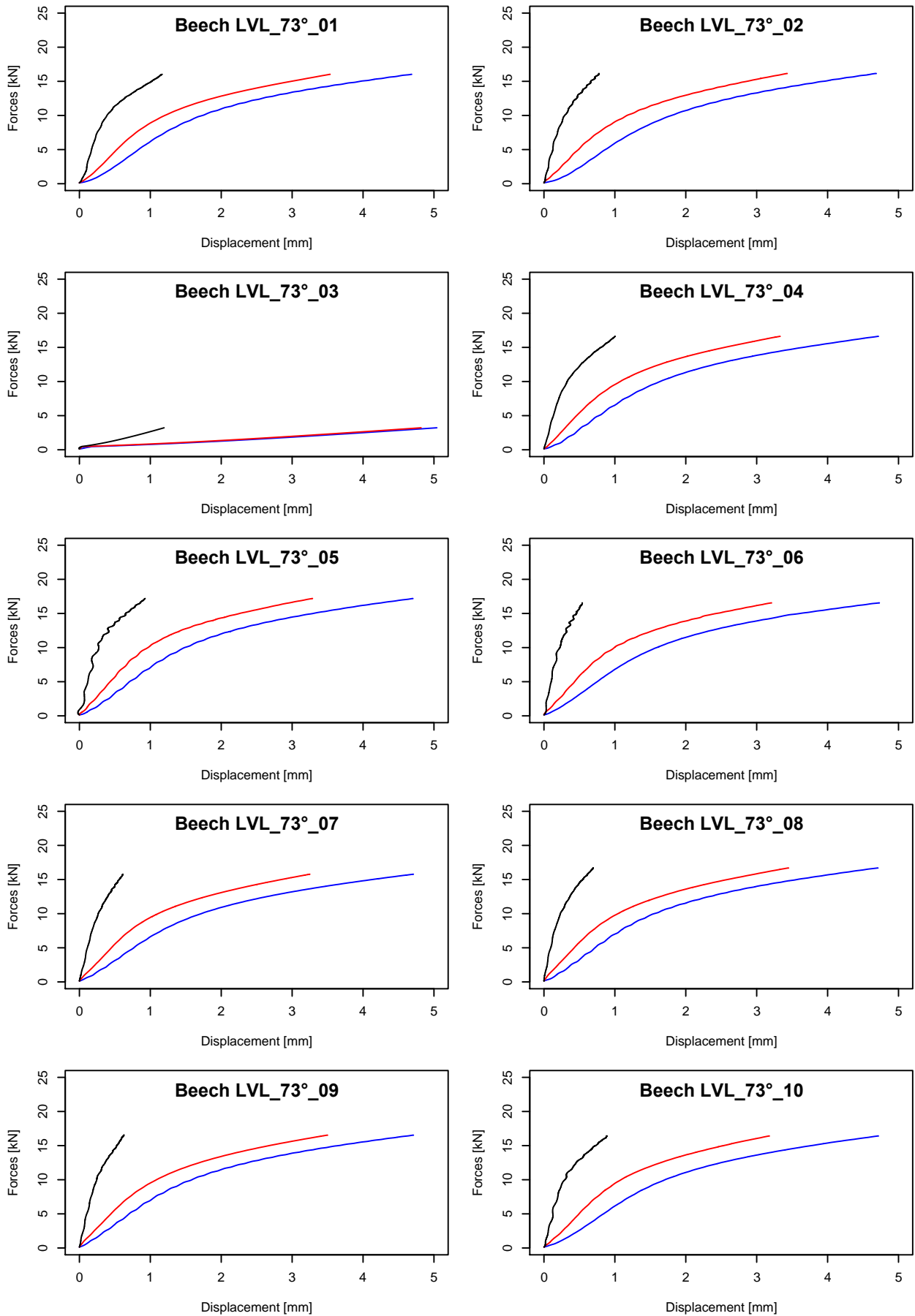


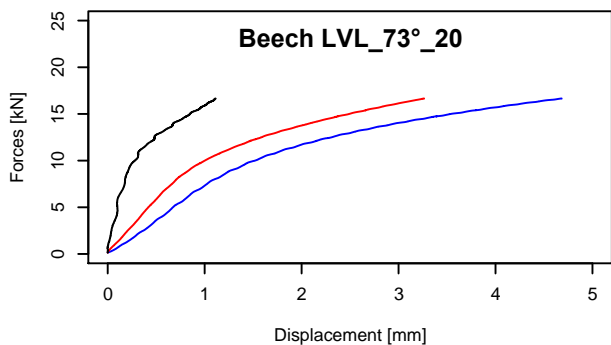
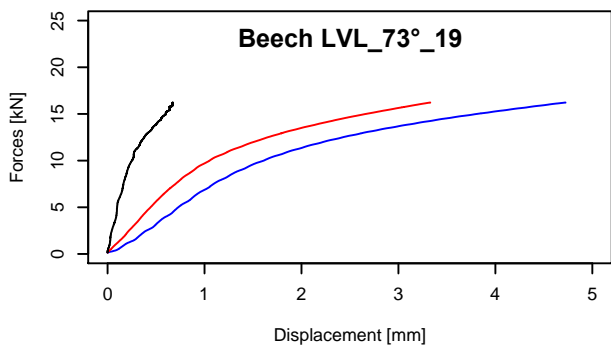
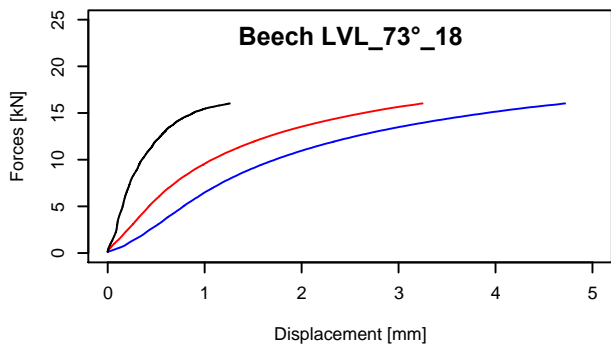
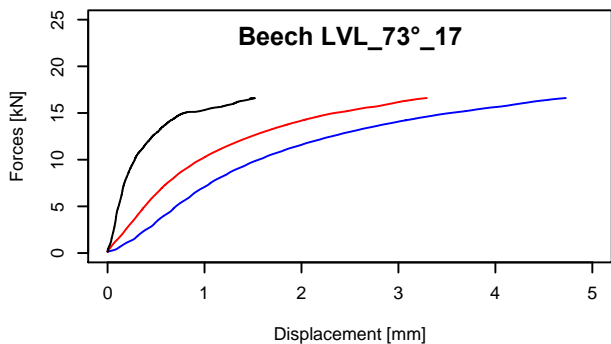
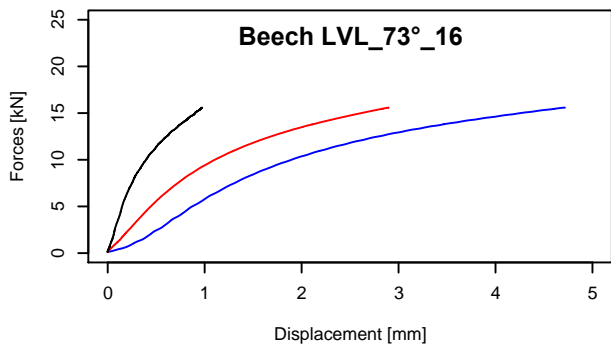
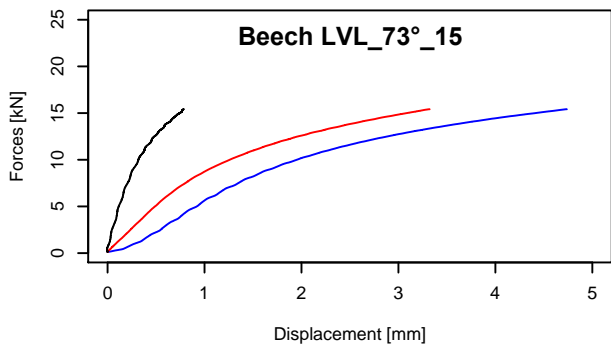
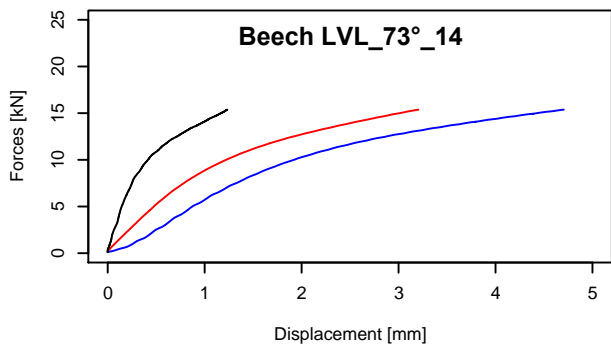
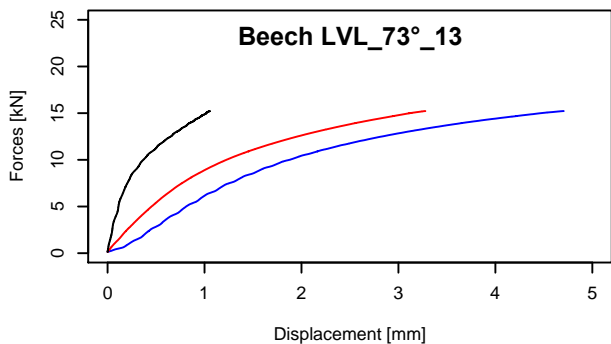
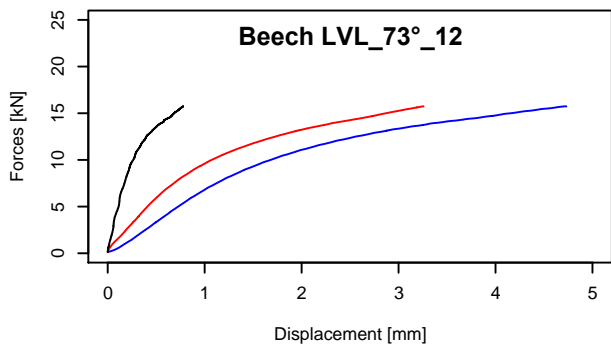
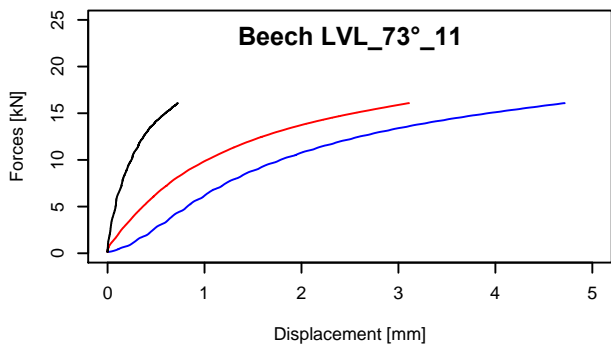


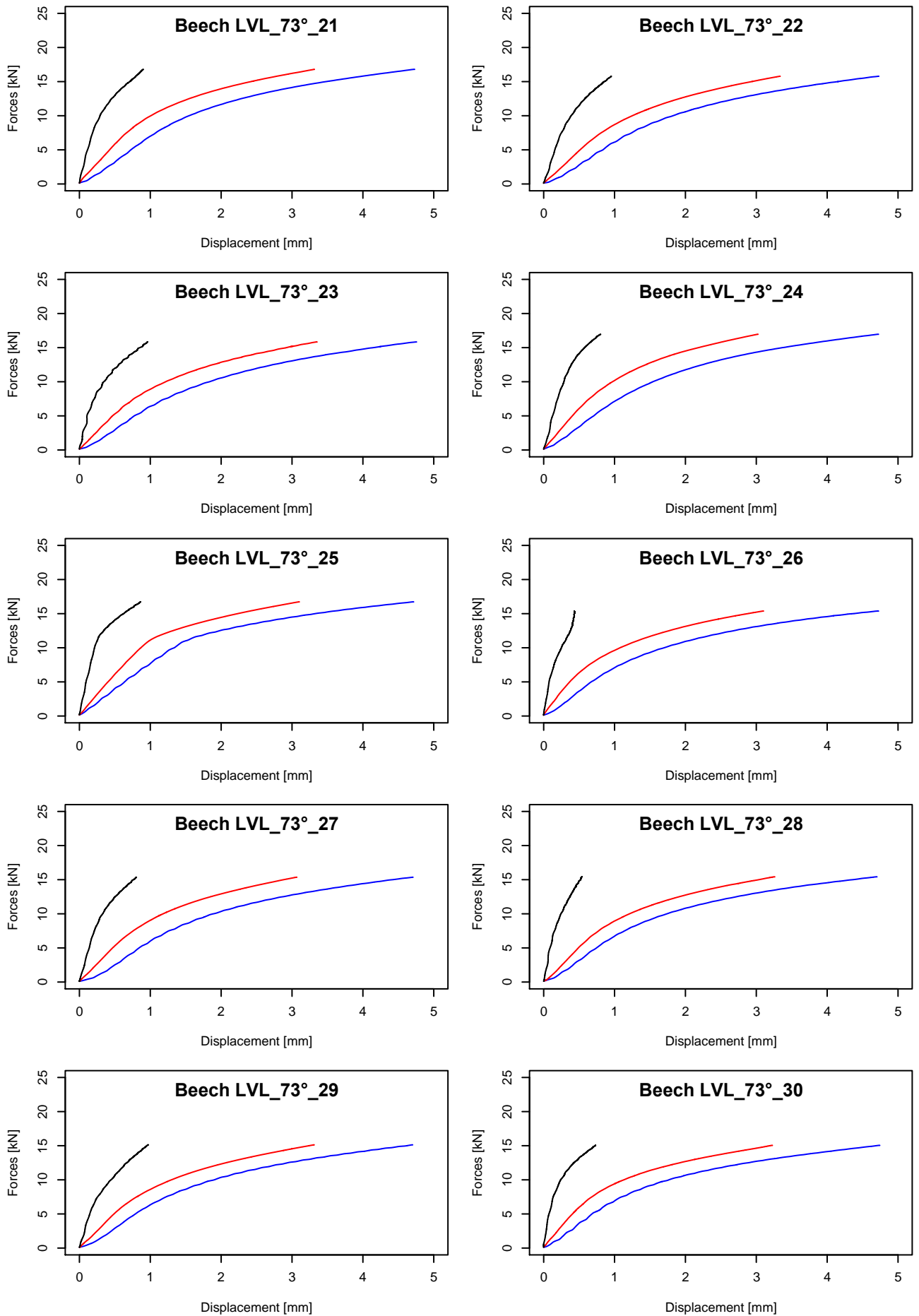


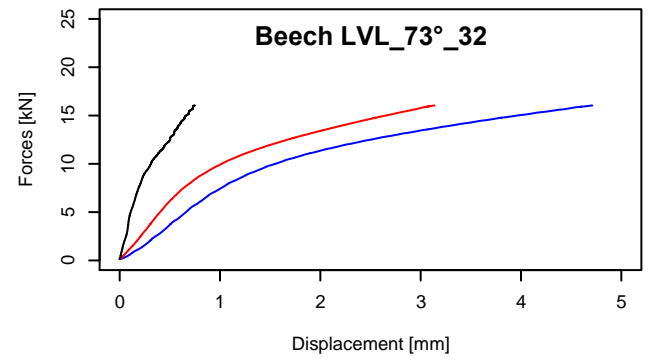
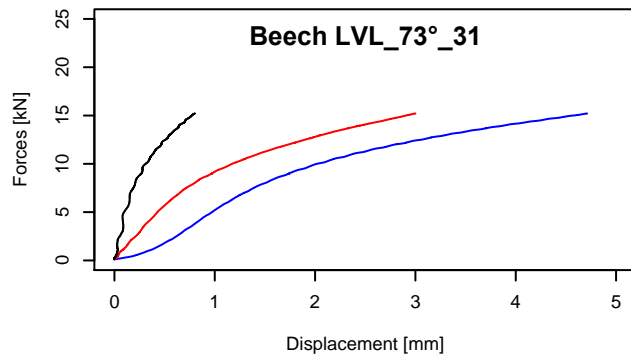


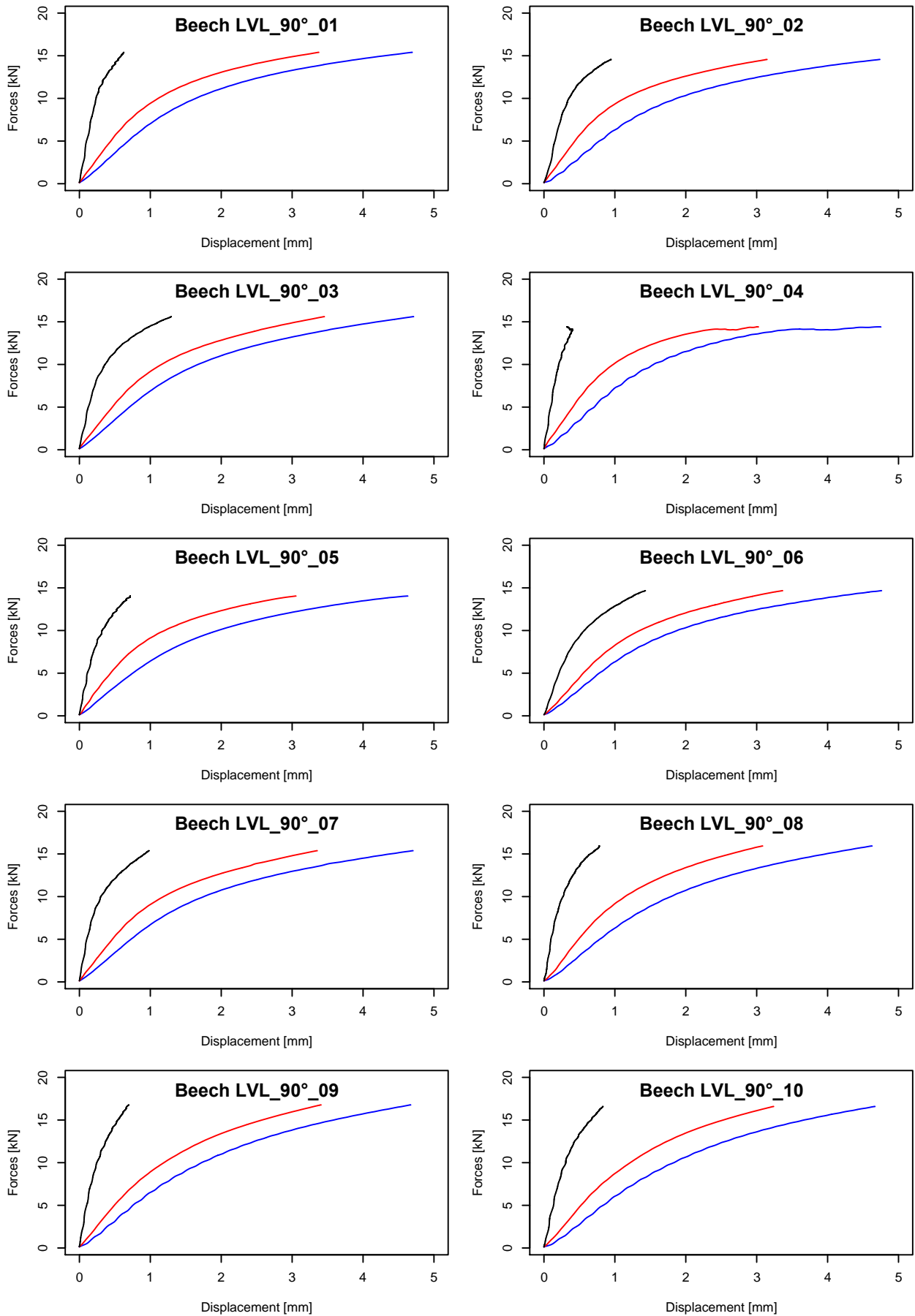


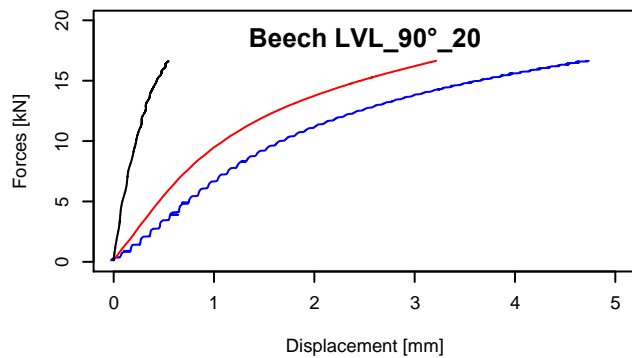
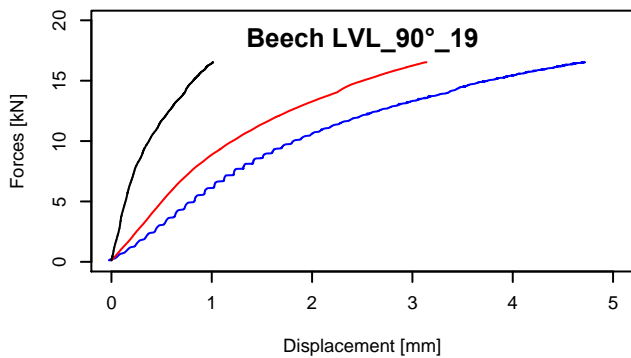
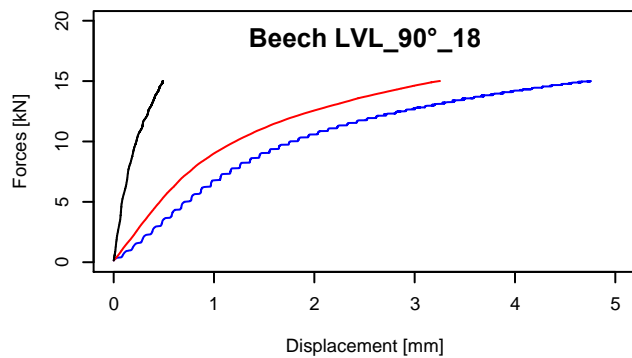
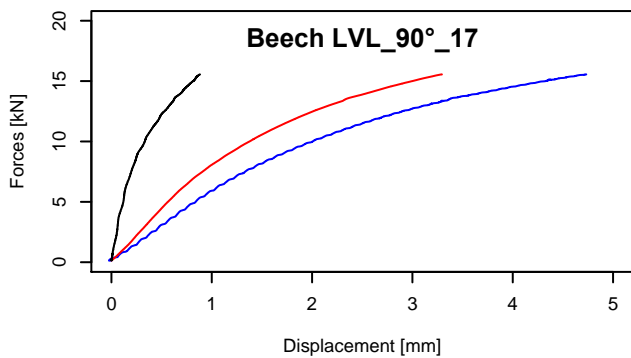
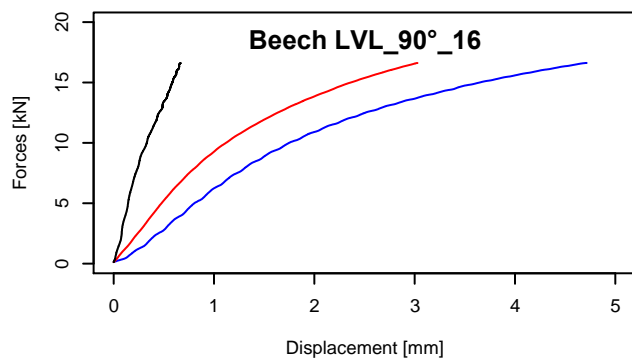
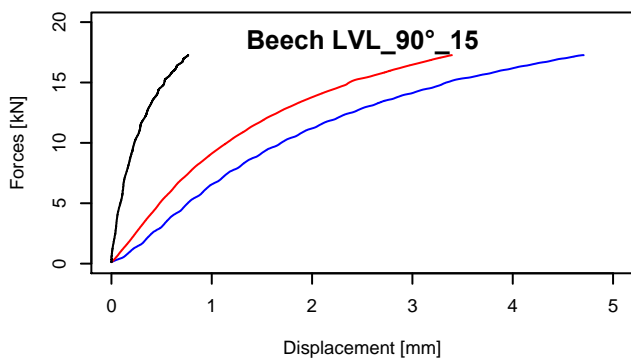
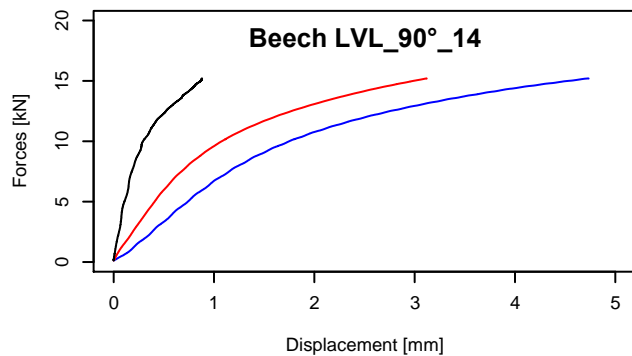
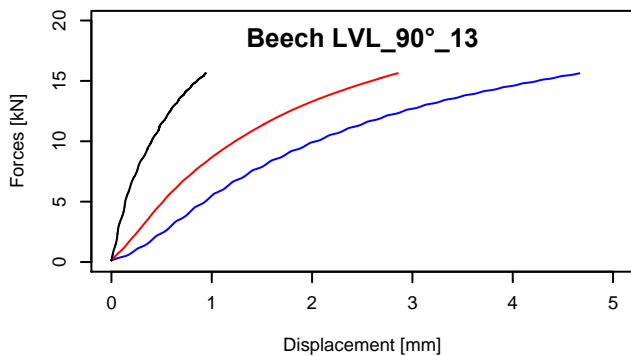
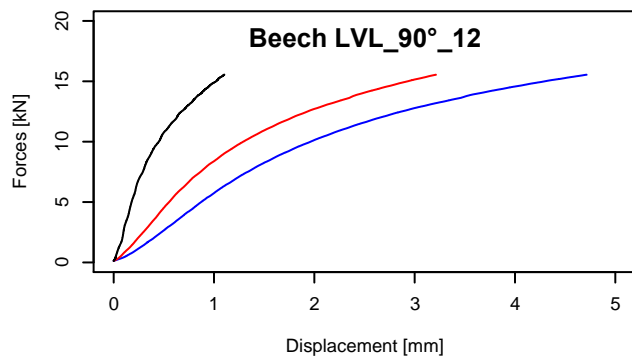
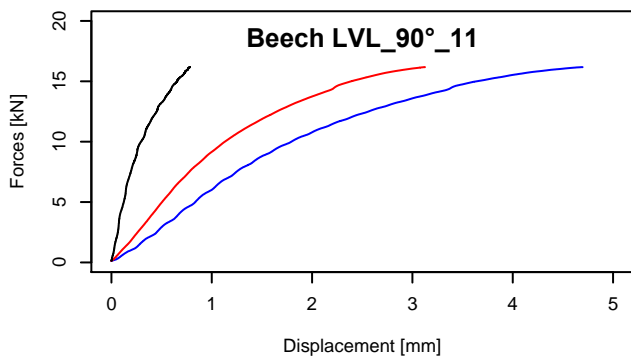


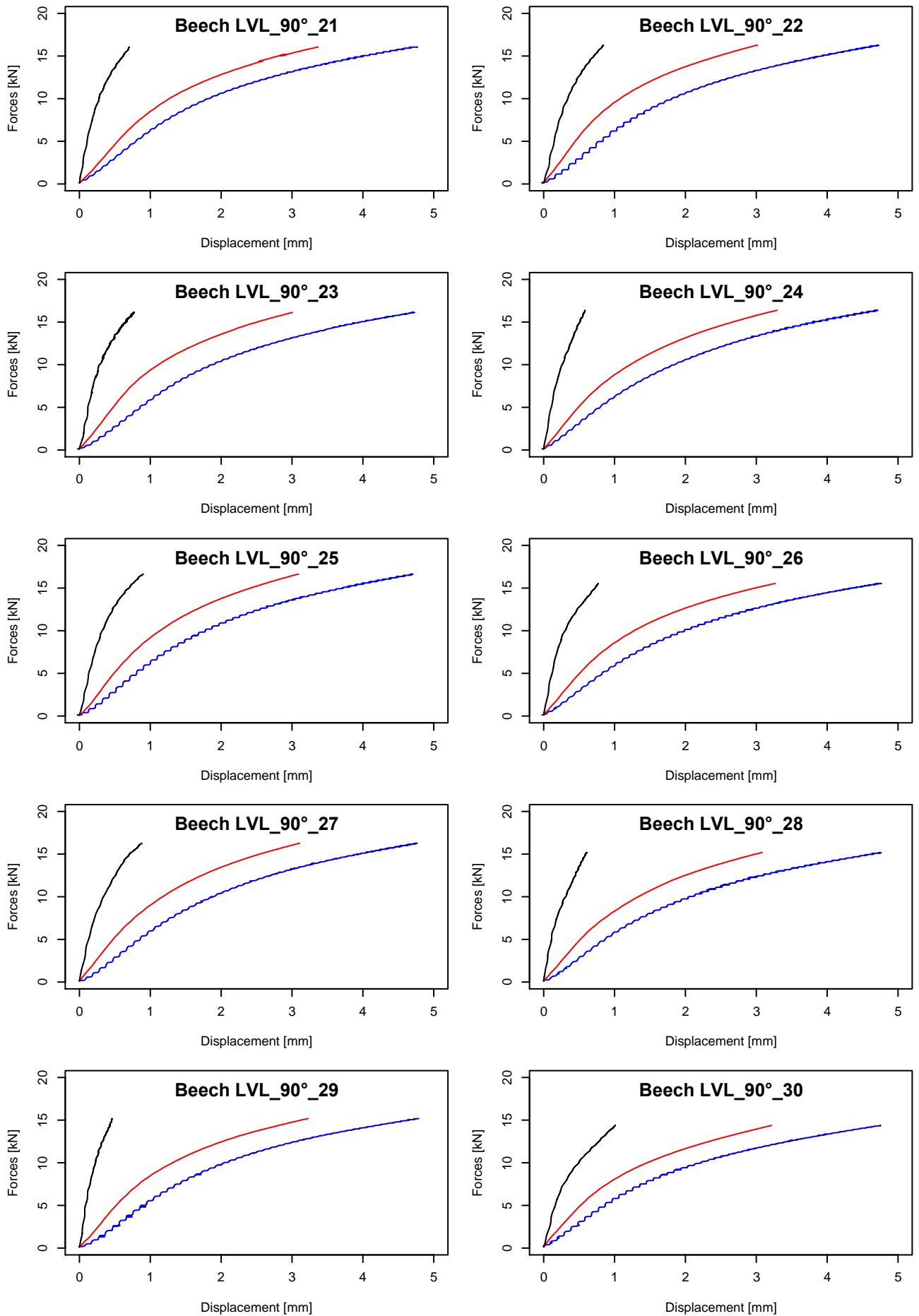












Annexe C – Valeurs remarquables pour chaque essai

name	angle	H%	ρ	σ_{max} [MPa]	E_{40} [MPa]	E_{60} [MPa]	E_{pt} [MPa]	u_{max}	u_0	σ_{offset} [MPa]	σ_{inter} [MPa]
BOU_0_01	0	10,6%	674,68	35,71	310,81	276,40		1,01	0,00	35,17	
BOU_0_02	0	10,4%	700,14	36,66	200,66	206,35		0,79	0,00	34,11	
BOU_0_03	0	10,6%	664,43	36,58	395,20	262,40		0,78	0,00	36,80	
BOU_0_04	0	10,1%	652,28	39,30	332,30	420,21		0,42	-0,02		
BOU_0_05	0	10,6%	642,31	37,96	382,25	350,97		0,33	0,00		
BOU_0_06	0	10,4%	677,39	37,98	261,07	260,13		0,62	-0,01	34,63	
BOU_0_07	0	10,9%	669,00	36,11	330,27	273,25		0,56	0,00	34,18	
BOU_0_08	0	10,7%	647,28	37,60	284,82	346,23		0,46	-0,02		
BOU_0_09	0	10,7%	630,09	37,57	466,52	346,68		0,40	0,00		
BOU_0_10	0	10,7%	656,58	36,39	255,43	261,94		0,48	-0,01		
BOU_0_11	0	10,6%	692,40	35,05	275,62	272,36		1,08	0,00	34,38	
BOU_0_12	0	10,3%	643,98	41,03	328,18	340,62		0,35	-0,01		
BOU_0_13	0	10,6%	679,17	32,11	168,69	185,48		0,73	-0,02	31,24	
BOU_0_14	0	10,8%	670,28	29,31	169,82	160,62		0,86	-0,01	29,11	
BOU_0_15	0	10,6%	688,46	31,41	194,61	153,93		1,10	0,02	31,52	
BOU_0_16	0	10,2%	703,47	22,50	138,27	130,23		0,45	0,00		
BOU_0_17	0	11,0%	636,74	36,40	307,44	299,80		0,49	0,00		
BOU_0_18	0	10,8%	636,59	34,62	254,01	252,68		0,74	-0,01	31,40	
BOU_0_19	0	10,8%	632,39	36,02	317,73	297,26		0,64	-0,01	32,48	
BOU_0_20	0	10,3%	653,53	39,48	312,94	371,12		0,39	-0,01		
BOU_0_21	0	10,7%	652,79	36,88	296,58	293,42		0,55	-0,01	35,51	
BOU_0_22	0	10,8%	677,09	33,80	211,69	203,53		0,56	-0,01	33,31	
BOU_0_23	0	10,5%	712,75	27,57	128,99	124,38		1,07	0,00	27,94	
BOU_0_24	0	10,5%	653,56	38,00	374,33	290,18		0,84	0,00	35,36	
BOU_0_25	0	10,3%	703,40	29,98	147,05	139,76		0,84	0,01	29,41	
BOU_0_26	0	10,4%	696,80	34,32	283,57	233,07		0,47	0,01		
BOU_0_27	0	10,5%	682,61	34,38	240,18	227,28		0,77	-0,01	33,67	
BOU_0_28	0	10,6%	652,63	37,85	267,43	278,20		0,78	-0,01	36,01	
BOU_0_29	0	10,2%	627,38	39,11	292,77	323,97		0,62	0,00	36,25	
BOU_0_30	0	9,8%	654,64	34,06	250,54	225,76		0,59	-0,01	34,08	
BOU_0_31	0	10,0%	651,98	39,13	338,55	331,46		0,61	-0,01	35,99	
BOU_0_32	0	10,0%	620,00	39,57	465,29	356,82		0,99	0,00	37,62	
BOU_27_01	27	11,8%	621,88	22,98	54,92	58,95		1,81	-0,01	23,06	
BOU_27_02	27	10,6%	610,01	20,44	59,02	53,40		1,69	0,01	20,66	
BOU_27_03	27	10,5%	616,41	21,44	72,34	64,76		1,67	-0,01	21,07	
BOU_27_04	27	10,0%	617,21	23,74	79,09	69,44		1,61	-0,03	23,43	
BOU_27_05	27	10,2%	632,57	23,86	90,11	82,96		1,37	-0,01	23,79	
BOU_27_06	27	10,3%	758,59	20,78	63,57	67,19		1,28	0,01	20,72	
BOU_27_07	27	10,4%	618,21	25,03	60,98	59,24		1,31	0,01	24,88	
BOU_27_08	27	10,3%	574,03	19,35	43,26	41,37		1,50	0,00	19,35	
BOU_27_09	27	10,0%	626,78	23,26	66,74	63,03		1,87	0,00	23,05	
BOU_27_10	27	10,2%	634,71	24,53	57,46	55,87		1,13	0,02	24,48	
BOU_27_11	27	10,6%	582,18	21,66	91,53	78,81		2,40	-0,01	21,68	
BOU_27_12	27	10,2%	574,90	21,27	53,74	53,13		1,46	-0,01	21,28	
BOU_27_13	27	10,4%	627,73	22,42	66,30	60,36		1,60	0,01	22,48	
BOU_27_14	27	10,3%	614,59	24,43	65,22	64,54		1,49	0,02	24,56	
BOU_27_15	27	9,9%	622,03	24,64	61,58	58,90		1,55	0,01	24,77	
BOU_27_16	27	10,2%	607,71	21,37	52,01	48,82		1,49	-0,01	21,13	
BOU_27_17	27	10,5%	582,86	23,54	89,23	84,39		1,34	-0,02	23,55	
BOU_27_18	27	10,5%	589,35	21,76	55,04	55,36		1,44	0,01	21,86	
BOU_27_19	27	10,1%	628,81	22,62	79,90	73,75		1,11	-0,02	22,69	

Références

BOU_27_20	27	10,1%	630,09	22,02	40,90	38,61		1,97	0,01	21,67	
BOU_27_21	27	10,2%	661,20	25,59	75,31	73,53		1,86	0,02	25,45	
BOU_27_22	27	10,5%	606,70	22,91	69,42	70,98		1,55	-0,01	22,94	
BOU_27_23	27	10,6%	633,24	20,44	44,56	38,71		1,96	-0,01	19,38	
BOU_27_24	27	10,6%	604,29	26,81	89,61	91,88		0,59	0,00		
BOU_27_25	27	10,6%	594,48	22,82	55,84	52,39		1,39	0,01	22,86	
BOU_27_26	27	10,0%	617,52	23,60	81,66	76,59		1,36	-0,01	23,62	
BOU_27_27	27	10,1%	600,30	21,67	71,65	67,61		1,19	-0,01	21,74	
BOU_27_28	27	10,2%	624,07	22,62	66,98	72,86		1,33	-0,02	22,56	
BOU_27_29	27	10,2%	580,64	19,85	77,20	69,89		2,05	-0,02	20,05	
BOU_27_30	27	10,0%	604,55	22,63	47,24	42,96		1,58	0,01	22,66	
BOU_56_01	56	11,3%	637,62	9,51	22,53	17,39	0,99	3,09	0,00	6,99	6,77
BOU_56_02	56	11,3%	649,67	10,32	30,43	25,77	0,90	3,01	-0,01	7,98	7,95
BOU_56_03	56	10,6%	589,40	7,65	15,42	12,05	0,65	3,86	-0,01	5,51	5,39
BOU_56_04	56	11,0%	595,79	9,22	13,12	7,76	0,92	3,91	0,01	5,95	6,07
BOU_56_05	56	10,2%	626,40	9,09	18,55	15,93	0,63	4,15	-0,02	6,79	6,68
BOU_56_06	56	10,6%	619,18	8,89	17,97	12,73	0,71	4,33	-0,02	6,18	6,03
BOU_56_07	56	10,7%	671,54	11,60	27,97	20,52	1,20	3,17	-0,02	8,21	8,14
BOU_56_08	56	10,9%	603,83	9,52	16,92	13,91	0,84	3,75	-0,02	7,06	6,66
BOU_56_09	56	10,7%	620,56	11,58	19,05	13,26	0,81	3,94	-0,01	8,30	8,77
BOU_56_10	56	10,8%	621,93	10,46	20,15	16,31	0,97	3,64	-0,01	7,58	7,28
BOU_56_11	56	10,9%	590,85	8,71	18,39	14,64	0,65	4,10	-0,03	6,41	6,28
BOU_56_12	56	10,5%	603,52	9,16	18,60	15,54	0,89	3,71	-0,01	6,57	6,14
BOU_56_13	56	11,1%	600,38	8,79	16,88	13,93	0,59	4,44	-0,03	6,38	6,38
BOU_56_14	56	10,6%	602,85	9,99	14,99	12,13	0,95	3,28	-0,04	7,63	7,34
BOU_56_15	56	10,9%	595,70	9,22	12,36	7,64	0,81	4,07	-0,03	6,13	6,32
BOU_56_16	56	11,0%	595,61	7,33	9,22	7,87	0,64	3,81	-0,03	5,21	5,23
BOU_56_17	56	11,0%	613,51	7,76	11,36	9,14	0,69	3,29	-0,02	5,69	5,86
BOU_56_18	56	11,2%	599,22	7,40	12,84	10,60	0,62	3,83	-0,02	5,38	5,23
BOU_56_19	56	11,2%	625,84	9,50	17,95	14,09	0,98	3,46	-0,03	6,53	6,45
BOU_56_20	56	11,1%	595,54	8,45	15,24	11,61	0,76	3,97	-0,02	5,86	5,72
BOU_56_21	56	10,9%	591,63	7,13	12,49	9,84	0,66	3,98	0,00	4,98	4,74
BOU_56_22	56	10,8%	590,84	6,66	9,38	6,49	0,51	4,28	-0,02	4,56	4,69
BOU_56_23	56	10,8%	683,34	11,61	14,13	6,24	1,23	4,13	-0,02	6,78	7,13
BOU_56_24	56	10,6%	606,77	9,07	15,65	11,66	0,89	3,88	0,01	6,18	6,00
BOU_56_25	56	10,7%	690,63	12,84	18,66	10,25	1,20	3,79	0,00	8,16	8,90
BOU_56_26	56	11,7%	666,31	12,83	25,63	20,18	1,20	3,61	-0,01	9,04	8,93
BOU_56_27	56	10,8%	590,06	8,83	16,00	12,56	0,88	3,47	-0,02	6,16	6,12
BOU_56_28	56	10,6%	585,90	7,93	11,49	6,83	0,72	4,04	0,00	5,29	5,36
BOU_56_29	56	10,7%	588,69	8,14	11,53	6,95	0,76	4,02	-0,01	5,41	5,43
BOU_56_30	56	10,8%	612,10	8,00	12,75	7,94	0,87	3,81	-0,02	5,28	5,03
BOU_73_01	73	10,6%	581,61	5,66	10,76	8,99	0,39	3,75	-0,03	4,35	4,33
BOU_73_02	73	10,7%	576,52	5,56	8,19	6,14	0,41	4,14	-0,02	3,75	4,09
BOU_73_03	73	10,7%	578,06	5,89	9,72	8,12	0,38	4,24	-0,03	4,26	4,44
BOU_73_04	73	10,7%	590,71	6,00	10,32	8,87	0,40	3,93	-0,04	4,59	4,61
BOU_73_05	73	10,7%	569,22	5,80	10,64	9,05	0,34	3,92	-0,03	4,53	4,60
BOU_73_06	73	10,6%	568,03	5,52	8,63	7,24	0,38	3,98	-0,02	3,95	4,19
BOU_73_07	73	10,7%	573,84	5,58	9,94	8,30	0,37	3,97	-0,03	4,22	4,30
BOU_73_08	73	10,8%	575,89	5,72	9,82	8,42	0,38	3,65	-0,04	4,46	4,52
BOU_73_09	73	10,5%	568,13	5,19	7,31	6,33	0,32	4,00	-0,03	3,79	4,10
BOU_73_10	73	10,8%	579,60	5,54	9,42	7,97	0,39	4,06	-0,03	4,05	4,16
BOU_73_11	73	10,9%	586,50	5,73	8,03	6,51	0,41	4,21	-0,02	4,02	4,27
BOU_73_12	73	10,6%	581,96	5,95	9,98	8,59	0,44	3,46	-0,02	4,54	4,67
BOU_73_13	73	10,1%	565,10	5,42	7,61	6,34	0,34	4,12	-0,03	3,91	4,20
BOU_73_14	73	10,0%	577,64	5,75	10,74	8,97	0,40	3,77	-0,02	4,41	4,43
BOU_73_15	73	10,0%	569,55	5,47	9,94	8,53	0,36	3,98	-0,02	4,17	4,20
BOU_73_16	73	9,9%	567,48	5,53	8,92	7,62	0,42	3,70	-0,02	4,20	4,20
BOU_73_17	73	10,3%	566,25	5,62	8,80	7,00	0,37	4,03	-0,01	3,96	4,31
BOU_73_18	73	10,2%	571,96	5,69	11,21	9,77	0,37	3,86	-0,02	4,26	4,40
BOU_73_19	73	10,5%	581,36	5,78	10,41	8,93	0,40	4,02	-0,03	4,30	4,37
BOU_73_20	73	10,3%	571,84	5,36	9,19	7,76	0,45	4,02	-0,02	3,78	3,77
BOU_73_21	73	9,9%	563,30	5,35	9,75	7,80	0,42	3,93	-0,02	3,75	3,89
BOU_73_22	73	10,1%	564,33	5,51	10,80	9,33	0,34	3,89	-0,03	4,22	4,31

BOU_73_23	73	10,2%	569,11	5,46	8,87	7,77	0,41	3,91	-0,02	3,91	4,07
BOU_73_24	73	10,1%	562,49	5,43	8,80	7,40	0,37	3,91	-0,02	3,84	4,16
BOU_73_25	73	9,9%	563,01	5,56	11,52	10,17	0,37	3,67	-0,03	4,32	4,33
BOU_73_26	73	10,0%	570,68	5,70	11,14	9,77	0,38	3,75	-0,02	4,40	4,40
BOU_73_27	73	10,3%	575,02	5,64	9,15	7,57	0,41	3,88	-0,02	4,06	4,22
BOU_73_28	73	10,1%	574,88	5,47	8,77	7,50	0,36	3,96	-0,01	3,95	4,23
BOU_73_29	73	10,1%	568,68	5,63	16,26	12,39	0,40	3,66	0,00	4,19	4,27
BOU_73_30	73	10,2%	581,67	5,67	10,18	8,55	0,40	3,68	-0,01	4,21	4,35
BOU_73_31	73	10,2%	572,04	5,57	9,38	7,65	0,42	3,80	-0,01	4,02	4,15
BOU_73_32	73	9,9%	575,74	5,54	9,00	7,41	0,36	3,96	-0,02	3,99	4,28
BOU_90_01	90	10,6%	558,00	4,75	7,92	7,18	0,30	4,08	-0,04	3,65	3,67
BOU_90_02	90	10,6%	552,26	4,56	7,11	6,17	0,30	4,29	-0,03	3,48	3,40
BOU_90_03	90	10,3%	553,27	4,81	8,62	7,49	0,35	4,17	-0,02	3,64	3,51
BOU_90_04	90	10,7%	552,46	4,80	8,07	7,03	0,36	4,11	-0,04	3,64	3,47
BOU_90_05	90	10,4%	556,76	5,06	7,25	6,64	0,45	4,26	-0,04	3,60	3,31
BOU_90_06	90	10,5%	562,15	4,93	7,95	7,36	0,30	4,30	-0,03	3,81	3,78
BOU_90_07	90	10,5%	552,48	4,72	7,46	6,79	0,33	4,38	-0,04	3,56	3,43
BOU_90_08	90	10,7%	555,66	4,65	7,41	6,52	0,33	4,12	-0,05	3,56	3,45
BOU_90_09	90	10,5%	562,70	4,98	8,08	7,33	0,39	4,17	-0,03	3,68	3,55
BOU_90_10	90	10,4%	562,48	4,81	8,08	7,43	0,31	4,29	-0,03	3,66	3,65
BOU_90_11	90	10,4%	551,55	4,69	8,66	7,45	0,33	4,11	-0,02	3,52	3,44
BOU_90_12	90	10,6%	557,96	4,80	8,38	7,42	0,33	4,35	-0,03	3,62	3,51
BOU_90_13	90	10,5%	554,50	4,80	7,92	6,96	0,32	4,40	-0,03	3,59	3,53
BOU_90_14	90	10,5%	550,71	4,74	7,14	6,31	0,33	4,29	-0,03	3,57	3,50
BOU_90_15	90	10,4%	564,07	5,22	9,73	8,85	0,28	3,77	0,00	4,27	4,29
BOU_90_16	90	10,4%	553,55	4,95	7,26	6,63	0,37	4,22	-0,03	3,66	3,54
BOU_90_17	90	10,3%	555,57	4,75	8,08	7,28	0,34	4,15	-0,02	3,58	3,47
BOU_90_18	90	10,3%	555,28	4,80	8,19	7,23	0,35	4,25	-0,02	3,56	3,45
BOU_90_19	90	10,5%	547,33	4,88	7,50	6,68	0,37	4,05	-0,04	3,63	3,56
BOU_90_20	90	10,6%	556,80	4,70	6,84	6,31	0,33	4,17	-0,05	3,57	3,50
BOU_90_21	90	10,4%	555,83	5,02	7,78	6,86	0,38	4,16	-0,04	3,77	3,62
BOU_90_22	90	10,2%	551,95	4,77	7,82	7,02	0,37	4,13	-0,01	3,55	3,40
BOU_90_23	90	10,2%	554,40	4,84	8,63	7,56	0,35	4,14	0,00	3,62	3,54
BOU_90_24	90	10,4%	553,43	5,05	7,92	6,68	0,42	4,30	-0,02	3,58	3,40
BOU_90_25	90	10,4%	559,59	4,90	7,28	6,57	0,37	4,18	-0,02	3,66	3,57
BOU_90_26	90	10,4%	556,59	4,82	7,06	6,49	0,38	4,05	-0,03	3,59	3,46
BOU_90_27	90	10,5%	561,74	5,11	7,66	6,72	0,41	4,28	-0,01	3,71	3,55
BOU_90_28	90	10,5%	555,25	4,80	7,69	6,83	0,32	4,27	-0,01	3,66	3,57
BOU_90_29	90	10,1%	553,36	4,76	8,51	7,44	0,33	4,30	-0,03	3,54	3,46
BOU_90_30	90	10,0%	554,80	4,63	8,04	7,19	0,37	4,06	-0,02	3,48	3,30
BOU_90_31	90	10,1%	565,95	5,24	8,72	7,30	0,42	4,16	-0,01	3,81	3,66
BOU_90_32	90	10,1%	559,97	4,88	7,75	6,98	0,38	4,16	-0,03	3,59	3,50
CHE_0_01	0	11,1%	546,72	24,15	149,22	124,95		1,29	0,00	24,14	
CHE_0_02	0	11,3%	560,38	25,76	122,61	119,24		0,89	-0,01	26,06	
CHE_0_03	0	11,3%	536,79	21,45	126,60	109,24		1,05	0,00	21,63	
CHE_0_04	0	11,2%	544,61	24,23	130,44	116,48		0,94	0,01	24,46	
CHE_0_05	0	11,2%	544,70	24,14	131,41	121,42		0,94	0,01	24,09	
CHE_0_06	0	11,3%	558,83	25,10	139,24	115,18		1,14	0,00	25,03	
CHE_0_07	0	11,4%	564,10	25,62	149,66	125,22		1,78	0,00	25,71	
CHE_0_08	0	11,3%	557,99	25,50	126,65	140,60		1,07	0,00	25,33	
CHE_0_09	0	11,4%	564,29	26,16	146,15	124,29		1,47	0,00	26,22	
CHE_0_10	0	11,1%	559,55	25,40	140,61	121,61		2,21	0,01	25,65	
CHE_0_11	0	11,2%	568,88	25,55	160,62	129,77		1,30	0,01	25,76	
CHE_0_12	0	10,6%	745,15	42,22	232,04	270,55		0,92	-0,02	40,65	
CHE_0_13	0	10,6%	673,99	36,65	202,55	215,56		1,47	0,00	35,54	
CHE_0_14	0	10,5%	755,05	43,31	291,34	260,75		0,98	0,01	42,24	
CHE_0_15	0	10,6%	728,10	41,40	219,54	230,09		2,25	0,00	40,07	
CHE_0_16	0	10,5%	653,45	34,98	195,77	211,21		0,67	-0,01	34,29	
CHE_0_17	0	10,8%	872,36	47,93	387,85	325,75		0,81	-0,01	47,31	
CHE_0_18	0	10,7%	839,28	42,38	284,90	259,38		1,21	0,00	42,32	
CHE_0_19	0	10,7%	869,43	47,06	311,22	334,18		0,93	-0,01	46,53	
CHE_0_20	0	10,9%	852,77	44,73	268,29	308,01		1,37	-0,01	43,46	
CHE_0_21	0	10,8%	838,10	45,00	347,67	314,94		1,82	0,01	44,41	

Références

CHE_0_22	0	10,6%	834,91	44,08	344,39	262,17		0,77	0,00	43,70	
CHE_0_23	0	12,5%	820,33	45,51	303,80	285,97		1,02	0,00	43,05	
CHE_0_24	0	8,9%	800,11	45,46	249,33	375,00		0,97	0,02	37,43	
CHE_0_25	0	8,7%	789,90	44,62	314,80	294,12		0,79	-0,01	41,84	
CHE_0_26	0	10,5%	799,60	45,14	253,99	274,61		1,16	0,00	43,25	
CHE_0_27	0	8,7%	798,69	46,09	250,57	285,47		1,15	-0,02	41,10	
CHE_0_28	0	8,6%	793,42	45,77	421,96	306,68		1,16	0,02	43,73	
CHE_27_01	27	8,8%	584,83	20,44	65,86	64,92		1,17	0,01	17,91	
CHE_27_02	27	9,7%	589,87	23,09	77,14	87,41		1,77	0,01	23,18	
CHE_27_03	27	10,2%	596,42	22,91	86,81	81,42		1,09	0,01	22,30	
CHE_27_04	27	8,8%	579,51	15,81	45,46	47,02		0,99	0,02	13,30	
CHE_27_05	27	8,7%	579,08	22,82	73,78	73,39		1,57	0,00	22,85	
CHE_27_06	27	11,8%	591,05	19,78	70,74	69,85		0,99	0,00	16,48	
CHE_27_07	27	10,1%	575,06	19,38	73,75	71,13		0,60	0,00		
CHE_27_08	27	8,6%	578,82	19,87	56,33	55,94		1,35	0,00	19,82	
CHE_27_09	27	10,0%	599,86	25,08	105,54	90,73		1,40	0,01	25,17	
CHE_27_10	27	8,8%	569,41	20,38	64,44	62,64		1,74	0,03	20,15	
CHE_27_11	27	10,0%	815,74	28,06	86,98	81,29		0,92	0,00	45,18	
CHE_27_12	27	8,9%	773,81	30,51	99,87	95,55		1,39	-0,01	30,51	
CHE_27_13	27	10,1%	786,93	25,92	70,62	77,74		0,68	-0,02		
CHE_27_14	27	8,9%	774,87	29,78	171,37	141,25		0,96	-0,03	28,80	
CHE_27_15	27	11,0%	837,31	28,23	75,66	77,19		1,19	-0,01	28,34	
CHE_27_16	27	8,9%	810,60	33,29	87,31	94,51		1,12	-0,01	33,36	
CHE_27_17	27	9,6%	789,23	28,61	89,34	83,59		1,22	0,01	71,43	
CHE_27_18	27	9,0%	773,44	30,63	89,54	91,84		1,18	0,00	30,66	
CHE_27_19	27	8,6%	909,54	37,48	122,96	139,70		2,18	-0,01	37,21	
CHE_27_20	27	8,8%	927,29	37,54	119,83	124,29	-0,72	3,81	-0,02	37,00	38,28
CHE_27_21	27	10,8%	895,37	35,21	98,69	85,98	2,21	4,20	0,00	30,64	27,37
CHE_27_22	27	10,3%	948,86	37,06	166,65	124,62	-0,86	3,88	0,01	35,18	37,34
CHE_27_23	27	8,7%	890,14	27,13	79,81	82,09		0,90	0,00	22,98	
CHE_27_24	27	10,0%	910,75	37,89	183,74	143,66	-2,01	3,66	0,01	38,26	39,43
CHE_27_25	27	9,7%	891,15	35,30	136,29	123,88		1,38	-0,02	35,15	
CHE_27_26	27	8,5%	893,11	37,35	157,33	141,80	-2,38	3,35	-0,01	37,42	36,37
CHE_27_27	27	9,4%	887,89	36,93	151,06	126,25		2,10	0,01	36,19	
CHE_27_28	27	8,5%	861,94	35,92	135,92	124,69		1,44	0,00	36,10	
CHE_56_01	56	13,8%	573,78	9,91	18,61	17,37		1,95	0,00	9,28	
CHE_56_02	56	15,3%	578,52	8,26	21,04	18,31		1,20	0,00	7,64	
CHE_56_03	56	12,2%	703,61	13,47	23,07	17,75	1,15	3,51	-0,01	9,70	9,82
CHE_56_04	56	10,3%	713,62	13,59	23,57	18,22	0,92	3,66	-0,02	9,61	10,65
CHE_56_05	56	12,9%	698,77	11,94	25,78	23,29	-0,80	3,99	0,00	10,01	13,14
CHE_56_06	56	10,5%	724,29	15,06	24,29	19,75	1,36	3,78	-0,01	10,70	10,67
CHE_56_07	56	12,6%	706,37	13,73	29,94	26,91	0,06	3,34	0,00	11,08	13,08
CHE_56_08	56	10,5%	729,92	14,89	-14,46	-13,31			-0,02	2,04	
CHE_56_09	56	13,1%	739,60	16,51	32,49	31,08	0,49	2,94	-0,02	13,66	15,40
CHE_56_10	56	11,2%	856,59	19,92	34,08	27,05	1,34	3,34	-0,02	14,52	16,16
CHE_56_11	56	12,4%	858,80	19,85	28,96	17,62	1,60	3,53	-0,04	13,21	15,12
CHE_56_12	56	13,5%	885,46	15,15	22,92	19,79		2,23	-0,01	12,21	
CHE_56_13	56	12,2%	860,61	14,08	20,37	18,98		2,23	0,01	12,52	
CHE_56_14	56	14,3%	880,48	15,85	-13,01	-12,45			-0,11	2,23	
CHE_56_15	56	15,8%	900,56	14,94	22,87	19,16		1,84	0,00	13,34	
CHE_56_16	56	10,8%	595,66	10,39	20,15	19,10	-0,92	3,33	0,00	8,45	11,78
CHE_56_17	56	8,8%	573,49	10,85	21,09	16,96	0,74	3,67	-0,02	7,96	8,47
CHE_56_18	56	8,8%	571,92	9,27	16,53	16,52	0,39	2,71	0,00	8,13	8,45
CHE_56_19	56	9,7%	585,33	10,12	18,29	17,29	-0,69	3,24	0,01	8,45	11,12
CHE_56_20	56	8,7%	586,50	9,06	17,46	17,25		2,10	-0,02	8,23	
CHE_56_21	56	8,5%	582,39	9,93	15,46	14,03	-0,10	3,66	-0,01	8,05	9,86
CHE_56_22	56	10,7%	602,12	10,09	17,35	16,67	0,27	3,81	-0,01	8,32	9,12
CHE_73_01	73	11,6%	563,33	8,41	17,27	14,81	0,49	4,02	-0,01	6,37	6,65
CHE_73_02	73	13,9%	569,47	8,16	16,71	14,27	0,34	3,96	0,00	6,49	6,99
CHE_73_03	73	13,3%	580,27	8,53	17,77	16,57	0,48	3,99	-0,01	6,93	6,79
CHE_73_04	73	12,8%	586,45	8,17	16,67	14,32	0,44	3,78	0,00	6,87	6,69
CHE_73_05	73	11,5%	667,69	9,50	17,99	14,98	0,83	3,84	-0,01	7,01	6,46
CHE_73_06	73	11,5%	668,24	9,30	19,69	16,70	0,65	3,82	0,01	7,26	7,06

CHE_73_07	73	12,6%	675,70	9,12	17,92	15,53	0,59	3,73	-0,01	7,04	7,15
CHE_73_08	73	11,5%	681,89	8,74	18,61	17,08	0,01	3,57	-0,02	7,28	8,49
CHE_73_09	73	11,3%	667,06	9,07	18,72	16,27	0,58	3,72	-0,02	7,17	7,14
CHE_73_10	73	12,2%	674,22	9,35	19,16	16,25	0,69	3,87	-0,01	6,90	6,89
CHE_73_11	73	11,4%	678,05	9,32	17,76	15,59	0,46	3,88	-0,02	7,09	7,58
CHE_73_12	73	11,4%	690,14	9,47	18,56	16,79	0,64	3,74	-0,01	7,22	7,27
CHE_73_13	73	12,5%	696,93	9,79	17,59	14,54	0,79	3,84	-0,01	7,01	7,06
CHE_73_14	73	11,3%	686,63	9,23	17,78	16,07	0,54	4,01	-0,02	7,14	7,37
CHE_73_15	73	11,2%	711,86	10,03	18,48	16,52	0,77	3,84	-0,01	7,47	7,39
CHE_73_16	73	13,3%	734,63	10,26	16,71	14,57	0,95	3,78	-0,02	7,41	7,08
CHE_73_17	73	12,6%	866,29	14,63	21,96	15,32	1,64	3,65	-0,02	9,68	9,28
CHE_73_18	73	11,0%	858,67	15,18	22,72	14,78	1,75	3,53	-0,04	9,94	9,71
CHE_73_19	73	11,1%	858,84	15,08	25,93	20,04	1,56	3,53	-0,01	10,49	10,19
CHE_73_20	73	13,6%	867,28	14,83	22,08	16,42	1,65	3,46	-0,02	10,17	9,85
CHE_73_21	73	10,8%	865,17	14,71	24,87	19,14	1,34	3,45	-0,02	10,30	10,61
CHE_73_22	73	10,8%	868,82	14,68	19,12	15,94	1,25	3,88	-0,01	10,41	10,63
CHE_73_23	73	11,9%	863,36	14,68	19,59	16,08	1,63	3,50	0,00	10,15	9,80
CHE_73_24	73	10,7%	862,30	14,13	20,90	16,92	0,80	3,98	0,01	10,10	11,27
CHE_73_25	73	10,7%	864,52	14,96	21,89	16,01	1,49	3,86	-0,02	10,09	9,85
CHE_90_01	90	13,4%	556,49	6,84	4,84	3,89	0,33	4,35	-0,05	5,44	5,74
CHE_90_02	90	11,7%	554,23	7,25	17,39	15,84	0,42	4,32	-0,01	5,96	5,57
CHE_90_03	90	11,1%	548,19	7,06	7,51	4,41	0,39	4,39	-0,05	4,66	5,57
CHE_90_04	90	11,3%	554,68	7,40	14,88	14,23	0,42	4,44	-0,01	6,11	5,70
CHE_90_05	90	11,6%	556,44	7,24	17,57	15,68	0,41	4,27	-0,01	5,91	5,58
CHE_90_06	90	11,2%	554,07	7,51	18,25	16,51	0,43	4,30	-0,01	6,19	5,77
CHE_90_07	90	11,3%	554,75	7,32	16,02	15,61	0,45	4,32	-0,02	5,99	5,49
CHE_90_08	90	11,2%	558,29	7,16	16,82	16,73	0,41	4,17	-0,02	5,88	5,58
CHE_90_09	90	11,4%	550,03	6,95	15,45	15,04	0,36	4,21	-0,02	5,87	5,54
CHE_90_10	90	11,1%	560,37	7,36	16,86	16,02	0,40	4,23	-0,02	6,08	5,77
CHE_90_11	90	11,2%	670,00	8,42	7,97	6,50	0,89	3,66	-0,04	5,78	5,73
CHE_90_12	90	11,4%	676,51	8,49	18,52	16,31	0,57	3,73	-0,01	6,81	6,42
CHE_90_13	90	11,3%	676,43	8,65	18,43	16,21	0,42	3,74	-0,02	6,78	7,12
CHE_90_14	90	11,3%	670,65	8,98	17,55	15,57	0,69	3,64	-0,02	6,88	6,82
CHE_90_15	90	11,3%	663,51	8,87	15,44	14,03	0,77	3,84	-0,02	6,40	6,33
CHE_90_16	90	11,4%	667,25	8,68	16,15	13,81	0,37	3,77	-0,03	6,55	7,28
CHE_90_17	90	11,4%	663,96	8,24	17,31	14,40	0,35	3,83	-0,01	6,37	7,06
CHE_90_18	90	11,4%	667,05	7,96	15,17	14,44	0,18	3,76	-0,02	6,43	7,34
CHE_90_19	90	8,9%	817,46	11,13	17,73	13,62	1,38	3,34	-0,03	7,38	6,98
CHE_90_20	90	8,9%	811,61	11,40	19,89	13,27	1,32	3,55	0,00	7,45	7,20
CHE_90_21	90	9,0%	812,09	11,30	20,57	14,27	1,21	3,50	-0,02	7,52	7,48
CHE_90_22	90	8,9%	808,83	11,31	17,48	12,98	1,41	3,48	-0,03	7,45	6,95
CHE_90_23	90	8,9%	814,35	11,27	17,67	11,89	1,29	3,58	-0,03	7,32	7,10
CHE_90_24	90	9,9%	816,25	11,25	17,18	12,55	1,22	3,62	-0,02	7,39	7,30
CHE_90_25	90	8,7%	809,73	11,07	19,33	13,42	1,25	3,53	-0,02	7,31	7,07
CHE_90_26	90	8,8%	813,96	11,22	18,49	12,22	1,22	3,62	-0,03	7,28	7,18
CHE_90_27	90	8,7%	814,22	11,26	18,20	12,71	1,31	3,59	-0,02	7,36	7,04
CHE_90_28	90	8,8%	817,52	11,32	16,01	11,18	1,15	3,95	-0,01	7,48	7,28
HET_0_01	0	11,2%	766,11	33,57	162,52	157,82		0,84	0,00	33,55	
HET_0_02	0	11,1%	763,66	33,64	156,30	177,18		0,65	-0,03	33,33	
HET_0_03	0	11,1%	753,10	34,80	138,81	157,75		0,53	-0,02		
HET_0_04	0	11,1%	747,54	35,28	162,66	181,20		0,59	-0,02	30,38	
HET_0_05	0	11,3%	702,32	37,02	223,60	223,35		0,49	-0,01		
HET_0_06	0	11,3%	712,66	37,25	358,26	297,39		0,53	-0,01	32,84	
HET_0_07	0	11,4%	728,56	37,16	274,43	289,91		0,60	-0,01	35,68	
HET_0_08	0	10,9%	756,79	36,95	167,35	195,16		0,69	-0,02	36,06	
HET_0_09	0	11,1%	715,17	38,91	168,16	189,64		0,80	-0,01	35,88	
HET_0_10	0	11,2%	709,84	39,92	252,45	243,33		0,59	-0,01	34,76	
HET_0_11	0	11,3%	714,18	38,52	222,01	247,20		0,50	-0,02		
HET_0_12	0	11,2%	746,00	41,12	242,37	267,73		0,68	-0,02	35,54	
HET_0_13	0	11,1%	730,94	44,19	251,34	304,33		0,85	-0,01	38,51	
HET_0_14	0	11,1%	709,02	40,89	252,31	254,79		0,64	-0,01	34,88	
HET_0_15	0	11,0%	711,29	41,11	297,13	263,63		0,58	0,00	35,01	
HET_0_16	0	11,1%	729,07	43,90	302,82	296,25		0,49	-0,01		

Références

HET_0_17	0	11,3%	698,23	41,35	260,47	280,28		0,54	-0,01	33,41	
HET_0_18	0	11,3%	702,82	42,49	323,21	289,45		0,49	-0,01		
HET_0_19	0	11,3%	720,26	43,83	281,06	324,53		0,70	0,00	34,88	
HET_0_20	0	11,2%	692,59	42,25	289,60	286,91		0,61	0,00	31,30	
HET_0_21	0	11,7%	689,71	42,27	549,71	344,42		0,29	0,00		
HET_0_22	0	11,4%	711,81	44,03	300,31	301,51		0,44	0,00		
HET_0_23	0	11,5%	691,19	38,84	337,17	275,30		0,42	0,00		
HET_0_24	0	11,3%	687,22	39,34	292,28	243,65		0,42	0,00		
HET_0_25	0	10,8%	706,11	41,47	292,66	274,08		0,40	0,00		
HET_0_26	0	10,8%	669,13	38,61	250,21	239,45		0,58	-0,01	32,54	
HET_0_27	0	10,7%	663,84	39,81	293,21	275,27		0,37	0,00		
HET_0_28	0	10,7%	668,52	39,11	214,04	187,14		0,46	0,01		
HET_0_29	0	10,5%	706,35	41,39	228,65	252,47		0,41	-0,01		
HET_27_01	27	11,3%	714,93	30,40	84,98	91,16		1,05	-0,02	30,33	
HET_27_02	27	11,3%	709,14	28,06	80,73	81,36		0,90	-0,01	27,53	
HET_27_03	27	11,2%	711,13	30,00	87,48	75,77		1,00	-0,01	30,06	
HET_27_04	27	11,1%	719,08	30,14	91,93	87,14		1,07	-0,01	30,39	
HET_27_05	27	11,2%	718,83	30,33	104,53	105,96		2,36	-0,01	30,81	
HET_27_06	27	11,0%	717,77	30,14	84,67	82,16		1,47	-0,01	30,34	
HET_27_07	27	11,0%	705,92	28,88	72,39	74,40		1,65	-0,03	29,25	
HET_27_08	27	11,4%	723,25	31,31	81,93	81,34		1,47	-0,02	31,60	
HET_27_09	27	10,8%	722,81	30,17	88,07	86,90		1,29	-0,01	30,65	
HET_27_10	27	10,9%	727,57	30,41	84,38	80,61		1,27	0,00	30,38	
HET_27_11	27	11,0%	723,30	30,63	84,52	82,04		1,25	-0,01	30,99	
HET_27_12	27	11,1%	719,69	30,25	86,62	83,77		1,51	-0,01	30,25	
HET_27_13	27	10,7%	655,19	20,49	51,07	47,89		1,62	-0,01	20,33	
HET_27_14	27	10,8%	662,11	20,93	95,80	73,62		1,36	-0,01	20,11	
HET_27_15	27	10,6%	656,41	20,28	52,56	47,55		1,72	0,00	19,88	
HET_27_16	27	10,9%	666,36	21,30	52,67	51,41		1,93	0,00	20,83	
HET_27_17	27	10,8%	663,95	20,73	64,01	56,13		1,38	-0,01	20,41	
HET_27_18	27	11,3%	684,72	22,40	81,10	73,30		1,94	-0,01	21,66	
HET_27_19	27	11,2%	675,19	21,14	46,46	43,34		1,89	0,00	20,81	
HET_27_20	27	11,4%	700,30	23,02	64,92	55,25		1,89	0,00	23,02	
HET_27_21	27	11,3%	694,47	23,09	56,48	50,32		1,72	-0,01	22,70	
HET_27_22	27	11,3%	718,42	25,37	78,62	66,96		1,66	-0,02	25,25	
HET_27_23	27	11,0%	671,83	21,84	95,74	67,00		1,70	-0,01	20,79	
HET_27_24	27	11,1%	701,55	24,08	83,69	65,17		1,60	-0,02	23,73	
HET_27_25	27	11,1%	699,50	23,51	103,04	68,69		1,70	-0,03	22,13	
HET_27_26	27	11,1%	716,25	25,31	91,17	76,56		1,37	-0,01	25,20	
HET_27_27	27	11,3%	702,06	24,23	61,70	55,64		1,71	-0,02	23,74	
HET_27_28	27	11,4%	744,49	24,48	96,34	59,01	0,32	2,61	-0,03	20,93	23,66
HET_27_29	27	11,0%	640,06	17,27	56,73	44,09		1,14	-0,03	17,29	
HET_27_30	27	11,2%	742,36	24,91	78,35	71,07		1,80	-0,01	23,56	
HET_27_31	27	10,9%	711,16	32,66	198,86	132,07		0,73	0,00	33,00	
HET_27_32	27	10,8%	711,71	30,18	126,35	101,46		1,04	-0,02	30,53	
HET_56_01	56	9,9%	705,55	17,89	66,17	35,08	1,13	3,71	-0,04	12,55	14,01
HET_56_02	56	10,3%	707,03	18,31	42,20	33,57	0,74	3,89	-0,01	13,77	15,71
HET_56_03	56	10,4%	705,96	17,95	43,95	38,17	0,77	3,80	-0,01	14,79	15,35
HET_56_04	56	10,7%	735,12	19,82	46,16	35,44	0,70	3,60	-0,01	15,87	17,55
HET_56_05	56	10,7%	728,61	19,38	46,11	34,64	0,84	3,56	-0,01	14,95	16,69
HET_56_06	56	10,4%	723,42	19,08	40,88	33,42	0,71	3,93	-0,02	14,96	16,61
HET_56_07	56	10,2%	722,45	19,47	44,55	34,76	0,84	3,62	-0,02	15,15	16,80
HET_56_08	56	10,2%	726,86	18,94	40,59	32,67	0,83	3,85	-0,02	14,63	16,09
HET_56_09	56	10,1%	721,41	19,13	43,21	32,97	0,95	3,57	-0,01	14,35	16,10
HET_56_10	56	10,5%	727,82	18,74	45,16	34,22	0,91	3,74	-0,01	13,96	15,66
HET_56_11	56	9,9%	695,81	12,07	20,72	13,57	0,90	3,65	-0,02	8,54	9,22
HET_56_12	56	9,8%	699,14	12,34	26,39	18,54	0,84	4,19	-0,03	9,10	9,08
HET_56_13	56	9,8%	698,60	12,12	20,73	15,63	1,04	3,08	-0,01	9,03	9,39
HET_56_14	56	9,6%	701,46	12,79	19,19	12,95	0,98	4,02	-0,03	9,11	9,39
HET_56_15	56	10,0%	698,90	12,98	22,89	16,07	1,02	3,01	-0,01	9,68	10,40
HET_56_16	56	9,2%	703,82	13,14	20,89	14,98	0,79	4,03	-0,02	9,73	10,42
HET_56_17	56	9,5%	700,79	13,71	24,17	17,79	1,07	3,14	-0,02	10,24	10,85
HET_56_18	56	10,5%	751,48	12,11	19,75	13,79	0,88	3,66	-0,02	8,75	9,24

HET_56_19	56	10,5%	763,86	13,69	20,99	14,34	1,18	3,52	-0,02	9,59	10,09
HET_56_20	56	10,1%	704,95	11,61	17,01	10,84	0,80	4,28	-0,03	7,92	8,62
HET_56_21	56	10,2%	713,57	12,20	21,12	14,69	1,01	3,43	-0,01	8,73	9,21
HET_56_22	56	9,8%	688,17	11,30	17,07	11,38	0,76	4,12	-0,04	7,80	8,53
HET_56_23	56	9,9%	696,10	11,74	20,39	13,53	1,18	2,94	-0,02	8,41	8,76
HET_56_24	56	9,8%	689,84	11,89	18,00	12,28	0,77	4,10	-0,02	8,38	9,13
HET_56_25	56	10,2%	706,70	18,07	46,09	39,91	0,93	3,38	-0,01	14,45	15,25
HET_56_26	56	10,2%	703,44	17,41	42,39	33,90	0,71	3,94	-0,02	13,20	14,84
HET_56_27	56	10,7%	744,77	20,36	50,43	43,92	0,83	3,62	-0,02	17,25	17,68
HET_56_28	56	10,0%	706,22	18,38	41,73	31,14	0,81	3,92	-0,01	13,46	15,53
HET_56_29	56	10,0%	718,81	17,86	40,31	32,88	0,76	4,04	-0,01	13,42	15,07
HET_56_30	56	10,0%	717,87	18,21	50,75	42,79	0,81	3,69	-0,01	15,06	15,51
HET_56_31	56	10,3%	718,71	18,35	37,23	31,25	0,82	3,87	-0,03	13,88	15,49
HET_56_32	56	10,4%	717,78	17,56	45,23	37,93	0,88	3,56	-0,02	14,26	14,75
HET_73_01	73	11,2%	742,59	11,84	32,56	27,99	0,68	3,75	-0,01	9,88	9,49
HET_73_02	73	11,3%	733,15	11,29	29,90	24,00	0,79	3,43	-0,01	8,75	8,81
HET_73_03	73	11,5%	726,77	10,58	29,47	23,58	0,59	3,53	-0,02	8,41	8,61
HET_73_04	73	11,7%	731,33	11,03	28,69	23,47	0,80	3,50	-0,02	8,62	8,45
HET_73_05	73	11,7%	726,08	11,13	27,05	23,39	0,81	3,67	-0,02	8,79	8,49
HET_73_06	73	11,3%	723,90	11,22	35,85	26,81	0,89	2,87	0,00	9,03	8,83
HET_73_07	73	11,6%	739,08	11,82	29,90	25,51	0,87	3,54	-0,02	9,05	8,99
HET_73_08	73	11,5%	734,93	11,75	27,42	24,07	0,96	3,08	-0,03	9,28	9,04
HET_73_09	73	11,4%	731,68	11,94	31,91	25,81	0,69	3,58	-0,01	9,47	9,66
HET_73_10	73	11,6%	736,92	11,74	29,29	25,51	0,88	3,44	-0,02	9,09	8,96
HET_73_11	73	11,2%	726,80	11,56	33,43	25,47	0,78	3,45	-0,01	9,13	9,02
HET_73_12	73	11,2%	726,30	11,43	31,44	25,13	0,57	3,54	-0,01	9,07	9,54
HET_73_13	73	11,7%	734,66	11,50	31,25	25,44	0,85	3,50	-0,02	8,88	8,77
HET_73_14	73	11,0%	724,85	11,20	33,11	25,97	0,78	3,37	-0,01	9,07	8,78
HET_73_15	73	11,1%	725,42	11,36	30,12	25,72	0,68	3,70	-0,01	8,98	9,07
HET_73_16	73	11,2%	732,06	11,36	33,76	26,91	0,91	3,34	-0,01	8,61	8,54
HET_73_17	73	11,3%	728,00	11,18	30,51	25,54	0,79	3,46	-0,01	8,84	8,62
HET_73_18	73	10,8%	718,37	11,34	27,35	22,06	0,93	2,97	-0,02	8,69	8,89
HET_73_19	73	10,6%	728,36	10,97	27,19	21,52	1,00	3,55	-0,02	7,95	7,68
HET_73_20	73	11,0%	717,00	10,82	22,95	17,11	1,80	2,67	-0,02	7,46	6,52
HET_73_21	73	10,7%	725,68	11,71	25,82	22,74	1,46	2,55	-0,02	8,76	8,57
HET_73_22	73	9,3%	752,34	16,49	45,93	40,56	0,71	3,96	-0,01	13,51	13,88
HET_73_23	73	9,5%	756,70	16,95	40,91	36,04	0,88	3,99	-0,01	13,23	13,73
HET_73_24	73	9,8%	775,31	19,23	46,38	37,40	0,95	4,12	0,00	13,99	15,69
HET_73_25	73	10,0%	757,87	16,51	40,93	33,96	0,90	3,88	-0,01	12,38	13,32
HET_73_26	73	10,0%	754,83	16,67	37,68	29,62	0,98	4,13	-0,02	11,92	12,99
HET_73_27	73	10,4%	768,72	16,56	39,81	34,08	1,00	3,94	-0,02	12,21	12,96
HET_73_28	73	10,0%	769,87	17,20	37,98	32,54	1,07	4,05	-0,02	12,37	13,21
HET_73_29	73	9,6%	755,36	16,50	41,16	35,35	1,03	3,54	-0,02	12,41	13,14
HET_73_30	73	9,8%	762,96	16,09	32,40	32,17	1,03	4,05	-0,04	11,72	12,28
HET_73_31	73	9,3%	764,80	20,19	46,94	37,21	1,06	3,99	-0,01	14,89	16,34
HET_90_01	90	12,1%	724,61	9,06	18,21	14,53	0,57	3,88	-0,02	6,78	7,02
HET_90_02	90	11,7%	733,52	9,18	24,27	16,08	0,66	3,64	0,00	6,75	6,94
HET_90_03	90	11,7%	715,54	9,03	19,22	14,47	0,54	4,06	-0,02	6,71	6,99
HET_90_04	90	11,5%	717,66	8,93	18,94	13,86	0,58	4,02	-0,03	6,58	6,78
HET_90_05	90	11,3%	715,08	8,82	17,44	13,67	0,55	4,06	-0,02	6,51	6,79
HET_90_06	90	12,0%	719,14	8,68	17,75	13,66	0,54	3,96	-0,03	6,46	6,71
HET_90_07	90	11,7%	731,37	9,31	18,07	13,86	0,79	3,68	-0,02	6,80	6,66
HET_90_08	90	11,7%	733,16	9,27	20,39	15,35	0,61	3,72	-0,01	7,01	7,18
HET_90_09	90	11,5%	731,39	9,10	18,12	13,92	0,63	3,77	-0,03	6,70	6,93
HET_90_10	90	11,9%	725,81	10,00	5,61	4,81	0,82	3,43	-0,13	8,20	8,35
HET_90_11	90	10,8%	755,62	9,47	18,58	14,70	0,53	3,82	-0,01	7,20	7,69
HET_90_12	90	10,2%	768,68	9,67	18,90	14,63	0,65	3,84	-0,01	7,15	7,40
HET_90_13	90	11,0%	726,13	8,84	14,47	12,33	0,60	4,00	0,01	6,60	6,75
HET_90_14	90	11,6%	724,50	8,75	14,19	11,98	0,58	3,95	0,01	6,48	6,70
HET_90_15	90	11,4%	724,65	8,78	13,50	11,37	0,61	3,91	-0,01	6,44	6,67
HET_90_16	90	11,2%	726,03	8,86	16,48	13,01	0,53	3,99	0,00	6,59	6,97
HET_90_17	90	11,3%	726,21	8,85	15,16	11,87	0,62	3,86	-0,02	6,44	6,71
HET_90_18	90	11,6%	715,13	8,74	17,11	13,04	0,56	4,07	-0,02	6,43	6,67

Références

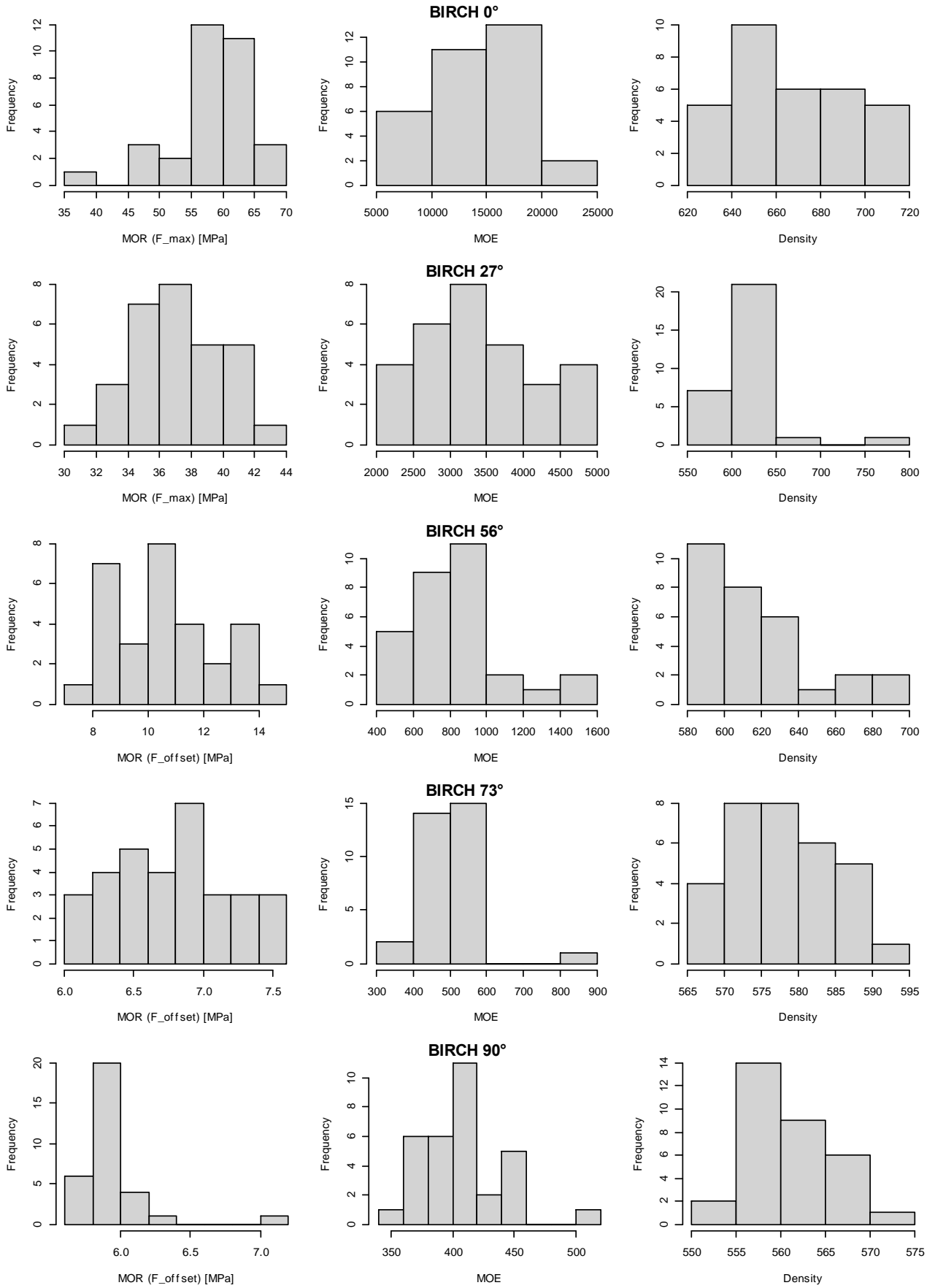
HET_90_19	90	11,2%	720,36	8,89	17,76	13,69	0,57	3,88	-0,02	6,66	6,86
HET_90_20	90	10,2%	780,53	9,28	17,66	14,50	0,54	3,82	-0,03	7,05	7,43
HET_90_21	90	10,4%	773,04	9,33	18,34	14,27	0,62	3,95	-0,02	6,87	7,07
HET_90_22	90	10,4%	760,06	9,27	18,17	13,49	0,67	3,83	-0,03	6,73	6,92
HET_90_23	90	10,2%	759,06	8,98	19,41	14,25	0,56	3,86	-0,02	6,68	6,97
HET_90_24	90	10,5%	755,76	9,00	18,53	14,23	0,58	3,89	-0,02	6,64	6,93
HET_90_25	90	10,2%	752,76	9,00	20,99	15,12	0,62	3,70	-0,02	6,62	6,88
HET_90_26	90	11,1%	724,74	8,97	17,00	13,02	0,63	3,76	-0,03	6,66	6,81
HET_90_27	90	11,3%	721,49	8,77	18,08	13,81	0,50	4,02	-0,02	6,57	6,92
HET_90_28	90	11,0%	710,13	8,76	16,68	12,48	0,52	4,17	-0,02	6,50	6,77
HET_90_29	90	10,2%	777,83	9,44	19,65	14,55	0,61	3,94	-0,02	6,99	7,23
HET_90_30	90	10,2%	767,37	9,58	19,71	14,90	0,60	3,82	-0,01	7,16	7,49
HET_90_31	90	10,0%	762,48	9,51	20,94	15,32	0,62	3,83	-0,02	7,06	7,33
HET_90_32	90	10,1%	774,53	9,48	17,54	13,66	0,66	3,88	-0,02	6,92	7,18
LVL_0_01	0	7,0%	758,56	49,65	270,70	226,72	-1,53	4,13	0,00	50,19	40,96
LVL_0_02	0	6,9%	740,70	46,83	297,44	255,57	-1,70	3,79	0,00	46,90	39,59
LVL_0_03	0	7,1%	747,43	47,92	319,82	288,66		0,57	0,02		
LVL_0_04	0	8,0%	766,37	45,67	268,36	244,16		1,62	0,01	46,00	
LVL_0_05	0	8,8%	763,86	46,84	360,75	320,99	-4,91	2,83	0,00	47,42	45,72
LVL_0_06	0	8,8%	772,70	50,46	263,39	242,26	1,20	2,97	-0,02	51,08	38,93
LVL_0_07	0	7,2%	755,97	47,68	251,17	212,31		1,66	-0,01	47,89	
LVL_0_08	0	7,3%	744,82	48,56	318,04	265,11		1,33	0,00	48,57	
LVL_0_09	0	7,1%	753,90	46,02	226,50	213,02	-1,34	3,79	-0,01	45,55	33,62
LVL_0_10	0	7,3%	752,48	48,30	237,30	222,32	-3,06	2,97	-0,01	48,38	45,44
LVL_0_11	0	9,9%	757,29	47,02	236,26	216,50		2,03	0,01	47,43	
LVL_0_12	0	6,1%	742,66	48,94	260,93	214,59	-0,66	3,47	0,00	49,43	34,83
LVL_0_13	0	6,1%	735,88	49,12	257,26	240,57	-2,62	3,42	0,01	48,94	37,87
LVL_0_14	0	6,0%	753,51	51,79	267,63	270,26	-1,97	3,29	-0,01	52,00	39,17
LVL_0_15	0	6,2%	751,31	51,69	257,71	247,77	-2,61	3,81	0,00	51,81	40,78
LVL_0_16	0	6,2%	741,82	49,88	247,72	219,35	-5,45	3,53	-0,01	49,91	48,30
LVL_0_17	0	6,2%	758,09	48,03	375,06	249,49	-1,92	3,62	-0,01	48,28	40,40
LVL_0_18	0	6,2%	768,89	51,84	198,24	234,57	-1,06	3,92	0,01	51,64	39,01
LVL_0_19	0	5,9%	760,94	54,17	262,96	259,51	-6,47	3,51	-0,01	55,11	52,91
LVL_0_20	0	6,1%	741,04	49,52	241,44	220,86	-0,60	4,23	0,00	49,55	35,58
LVL_0_21	0	6,2%	759,70	51,84	243,42	230,53	-0,29	4,15	0,00	52,06	36,59
LVL_0_22	0	5,9%	744,87	51,45	204,32	243,45	-0,86	3,59	0,02	50,07	36,03
LVL_0_23	0	6,3%	744,54	47,92	244,93	239,64		1,66	0,01	45,56	
LVL_0_24	0	6,3%	763,29	51,96	278,15	244,02		1,41	0,01	52,09	
LVL_0_25	0	6,0%	750,37	52,00	271,35	276,91	-0,05	3,45	0,02	52,59	34,38
LVL_0_26	0	6,1%	757,29	51,33	342,07	310,85	-4,86	3,54	0,00	50,12	46,96
LVL_27_01	27	6,1%	776,80	26,95	66,16	66,93		0,75	-0,03	26,55	
LVL_27_02	27	6,0%	776,94	27,13	46,02	51,28		1,03	0,01	22,33	
LVL_27_03	27	6,1%	771,95	27,78	56,40	53,43		0,82	-0,01		
LVL_27_04	27	6,0%	763,63	34,09	55,51	48,70	4,95	2,56	0,00	22,45	23,18
LVL_27_05	27	6,2%	778,14	36,22	71,64	56,14	2,24	3,01	-0,03	31,27	30,53
LVL_27_06	27	6,2%	785,01	36,60	63,21	51,81	3,01	3,03	-0,02	29,89	28,95
LVL_27_07	27	6,3%	791,49	35,75	63,76	50,23	-1,84	2,99	0,01	27,42	38,08
LVL_27_08	27	6,2%	795,04	35,70	56,51	47,77	5,29	3,42	0,02	24,32	20,43
LVL_27_09	27	6,2%	798,66	27,11	91,98	83,34		0,99	0,01	26,82	
LVL_27_10	27	6,0%	798,33	30,15	113,50	101,64		0,98	0,01	26,82	
LVL_27_11	27	5,9%	766,38	28,92	51,42	54,36		1,09	0,02	26,67	
LVL_27_12	27	5,9%	768,56	26,75	57,33	50,03		1,85	-0,01	24,77	
LVL_27_13	27	6,0%	790,72	27,05	57,07	52,80		1,65	0,01	22,92	
LVL_27_14	27	5,9%	775,79	28,44	72,73	72,60		0,88	0,01	28,10	
LVL_27_15	27	5,7%	777,55	34,49	70,44	36,87	3,00	3,50	-0,06	21,45	25,20
LVL_27_16	27	6,0%	758,26	20,85	44,23	36,56		0,97	-0,04	20,27	
LVL_27_17	27	5,9%	757,28	23,20	46,21	45,55		1,16	0,01	23,24	
LVL_27_18	27	5,9%	759,17	24,95	43,35	40,86		0,99	-0,02	24,44	
LVL_27_19	27	6,0%	744,33	24,27	63,46	56,23		0,67	-0,01		
LVL_27_20	27	7,9%	765,72	17,22	65,39	65,10		0,61	0,01		
LVL_27_21	27	5,9%	764,07	22,43	64,48	66,20		0,69	0,01		
LVL_27_22	27	7,7%	771,82	25,46	73,90	71,63		0,74	-0,01	27,15	
LVL_27_23	27	5,9%	747,47	15,92	78,17	70,75		0,89	0,01	10,77	

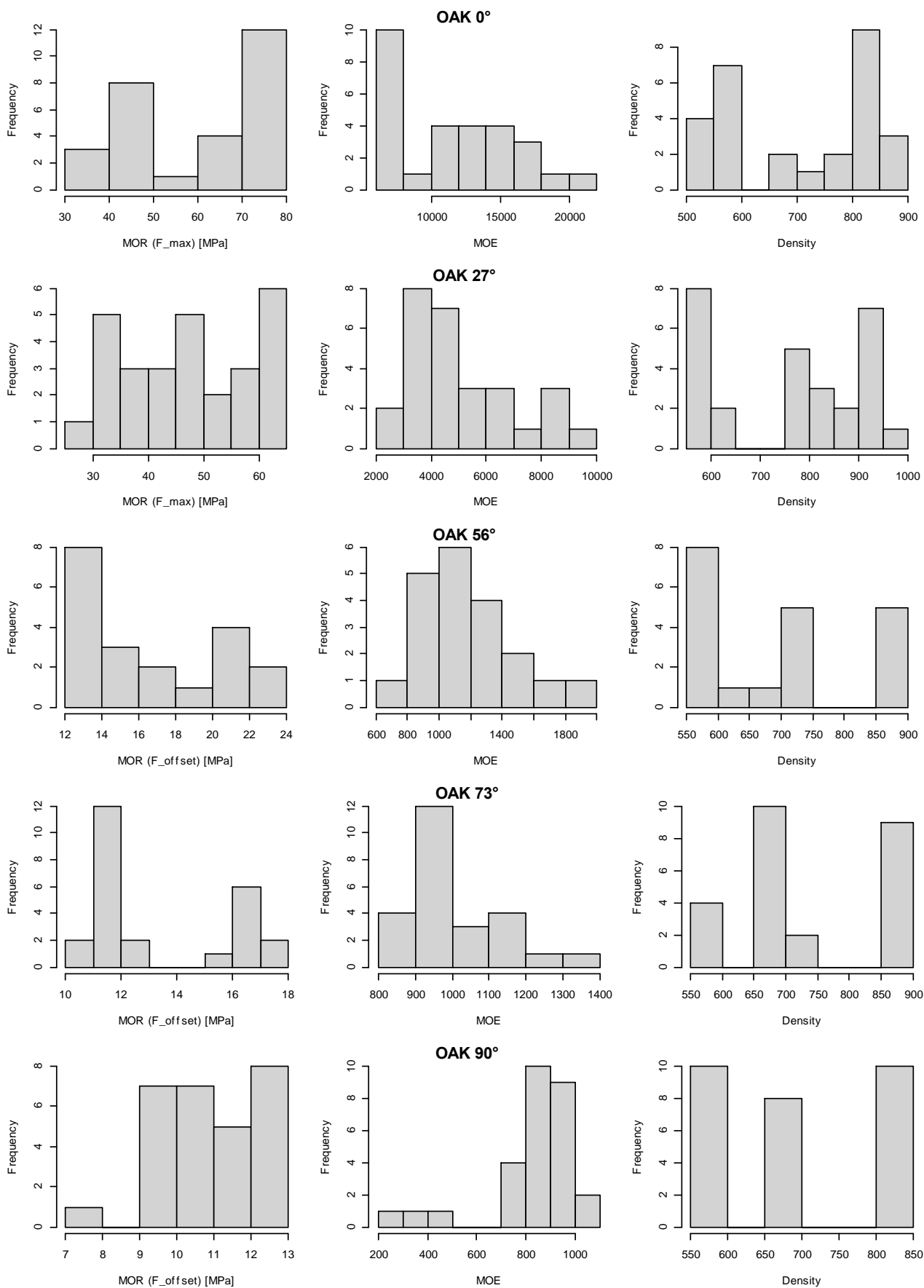
LVL_27_24	27	5,8%	737,61	28,41	84,74	84,51		0,48	-0,01		
LVL_27_25	27	8,0%	770,12	28,00	74,20	76,62		0,73	-0,02	26,84	
LVL_27_26	27	5,7%	748,74	30,30	97,53	92,80		0,59	0,01		
LVL_27_27	27	5,6%	759,35	24,19	83,88	78,72		0,54	0,00		
LVL_27_28	27	5,6%	749,22	25,68	77,21	74,72		0,96	0,01	17,92	
LVL_27_29	27	5,7%	737,24	25,52	92,19	85,22		0,64	0,00		
LVL_56_01	56	5,8%	762,98	19,49	14,90	12,92	2,41	3,62	0,01	12,96	13,39
LVL_56_02	56	5,3%	761,00	15,55	19,36	18,69		1,39	0,01	15,53	
LVL_56_03	56	5,3%	768,71	17,37	18,10	17,47		1,98	-0,01	15,91	
LVL_56_04	56	4,9%	756,61	15,74	20,81	18,43		1,50	0,07	14,78	
LVL_56_05	56	5,3%	760,46	19,18	16,20	13,50	2,29	3,01	0,02	14,67	14,84
LVL_56_06	56	5,1%	776,27	20,29	15,15	12,70	1,94	3,45	0,01	15,52	15,93
LVL_56_07	56	5,4%	779,38	16,81	17,22	16,27	1,15	2,61	0,07	15,37	15,33
LVL_56_08	56	4,9%	751,76	14,44	14,37	13,91		1,75	0,02	13,78	
LVL_56_09	56	5,0%	744,78	19,40	13,41	11,39	2,47	3,56	-0,07	13,59	13,21
LVL_56_10	56	4,8%	756,85	16,04	14,17	13,33	0,27	4,16	0,05	15,17	15,11
LVL_56_11	56	4,6%	749,42	19,07	14,75	12,51	2,18	3,05	0,05	14,58	15,12
LVL_56_12	56	4,4%	768,55	19,83	15,70	13,62	1,96	3,11	-0,01	15,33	15,72
LVL_56_13	56	4,8%	778,98	19,68	16,03	14,28	1,67	3,21	-0,01	15,72	16,28
LVL_56_14	56	4,6%	780,02	18,62	16,42	14,77	1,06	3,71	-0,08	16,10	16,95
LVL_56_15	56	3,3%	772,51	19,85	19,54	18,07	0,78	3,13	0,00	16,80	18,12
LVL_56_16	56	1,7%	787,88	19,82	18,54	16,66	0,36	3,48	0,00	16,51	18,23
LVL_56_17	56	3,9%	756,08	18,88	16,84	15,29	1,24	3,52	0,00	15,43	15,47
LVL_56_18	56	2,6%	741,23	17,02	15,45	14,17	0,65	2,54	0,01	12,79	15,37
LVL_56_19	56	3,1%	746,82	17,80	17,42	15,92	0,86	3,13	0,01	14,54	15,49
LVL_56_20	56	2,9%	757,95	15,91	19,36	18,14	0,30	3,20	0,00	14,81	15,07
LVL_56_21	56	4,4%	766,46	19,50	17,45	15,61	3,30	3,23	0,00	14,90	10,85
LVL_56_22	56	3,3%	757,05	14,37	17,14	16,29		1,61	0,01	13,96	
LVL_56_23	56	3,2%	766,14	19,92	10,05	9,28	1,06	4,99	0,09	2,60	16,62
LVL_56_24	56	4,3%	770,45	19,11	16,79	14,38	1,37	3,67	0,00	14,90	15,49
LVL_56_25	56	4,6%	751,66	19,64	17,94	15,77	1,78	3,12	0,03	15,81	15,88
LVL_56_26	56	4,3%	762,68	17,67	15,06	13,64	1,09	3,63	0,00	15,01	14,84
LVL_56_27	56	3,4%	758,75	18,30	15,77	13,65	1,38	3,45	0,00	14,57	15,02
LVL_56_28	56	5,1%	789,36	19,07	16,50	13,87	1,49	3,48	-0,01	14,58	15,63
LVL_56_29	56	3,3%	764,44	18,84	17,31	14,42	1,80	3,28	-0,02	14,34	14,53
LVL_56_30	56	4,6%	771,09	19,70	18,47	16,12	2,08	3,53	-0,01	15,07	14,13
LVL_73_01	73	8,6%	795,74	16,03	10,41	8,92	2,11	3,54	0,05	11,42	11,01
LVL_73_02	73	7,4%	790,63	16,15	10,37	8,62	2,30	3,43	0,00	11,25	10,79
LVL_73_03	73	8,9%	787,97	3,22	0,47	0,51	0,67	4,82	-0,84		1,38
LVL_73_04	73	6,9%	785,72	16,63	10,90	9,33	2,34	3,33	0,01	12,01	11,42
LVL_73_05	73	8,9%	814,11	17,20	11,71	10,36	2,34	3,29	0,01	12,75	12,07
LVL_73_06	73	7,5%	784,19	16,56	11,42	10,05	2,32	3,21	-0,01	12,14	11,58
LVL_73_07	73	10,1%	787,70	15,78	10,75	9,36	2,25	3,25	-0,01	11,37	10,82
LVL_73_08	73	8,2%	798,95	16,70	10,83	9,29	2,20	3,45	-0,03	11,89	11,49
LVL_73_09	73	9,7%	805,19	16,54	10,50	8,99	2,14	3,50	-0,03	11,79	11,46
LVL_73_10	73	8,0%	800,99	16,42	10,62	9,54	2,51	3,18	0,03	12,24	11,32
LVL_73_11	73	9,3%	771,99	16,09	11,08	9,11	2,37	3,11	-0,08	11,56	11,08
LVL_73_12	73	7,3%	755,01	15,75	11,15	9,28	2,07	3,26	-0,04	11,32	11,03
LVL_73_13	73	10,1%	766,30	15,23	9,84	8,23	2,18	3,28	-0,05	10,88	10,47
LVL_73_14	73	7,4%	750,89	15,38	9,63	8,29	2,33	3,20	-0,04	11,26	10,49
LVL_73_15	73	10,1%	781,65	15,42	9,77	8,20	2,28	3,32	-0,02	10,97	10,41
LVL_73_16	73	7,3%	765,79	15,59	10,89	9,23	2,64	2,90	-0,01	11,27	10,67
LVL_73_17	73	9,3%	797,64	16,61	12,41	10,24	2,08	3,29	-0,02	11,94	11,92
LVL_73_18	73	7,7%	769,33	16,03	11,15	9,27	2,21	3,25	-0,02	11,57	11,27
LVL_73_19	73	8,4%	787,42	16,23	11,20	9,66	2,15	3,33	0,00	11,78	11,39
LVL_73_20	73	10,4%	818,46	16,66	11,54	9,97	2,38	3,26	-0,01	11,85	11,34
LVL_73_21	73	8,2%	799,70	16,81	11,16	9,71	2,27	3,32	-0,02	12,17	11,76
LVL_73_22	73	9,8%	791,05	15,79	9,70	8,25	2,36	3,34	0,00	11,30	10,67
LVL_73_23	73	10,6%	796,84	15,84	10,08	8,28	2,33	3,35	-0,02	11,07	10,60
LVL_73_24	73	8,1%	791,28	16,97	11,80	9,93	2,59	3,02	-0,02	12,48	11,82
LVL_73_25	73	10,6%	799,83	16,74	11,81	11,28	2,17	3,10	-0,02	13,02	12,33
LVL_73_26	73	8,1%	783,94	15,39	12,18	9,31	2,20	3,10	-0,04	10,70	10,52
LVL_73_27	73	11,7%	799,29	15,37	10,51	8,81	2,46	3,07	0,00	11,18	10,38

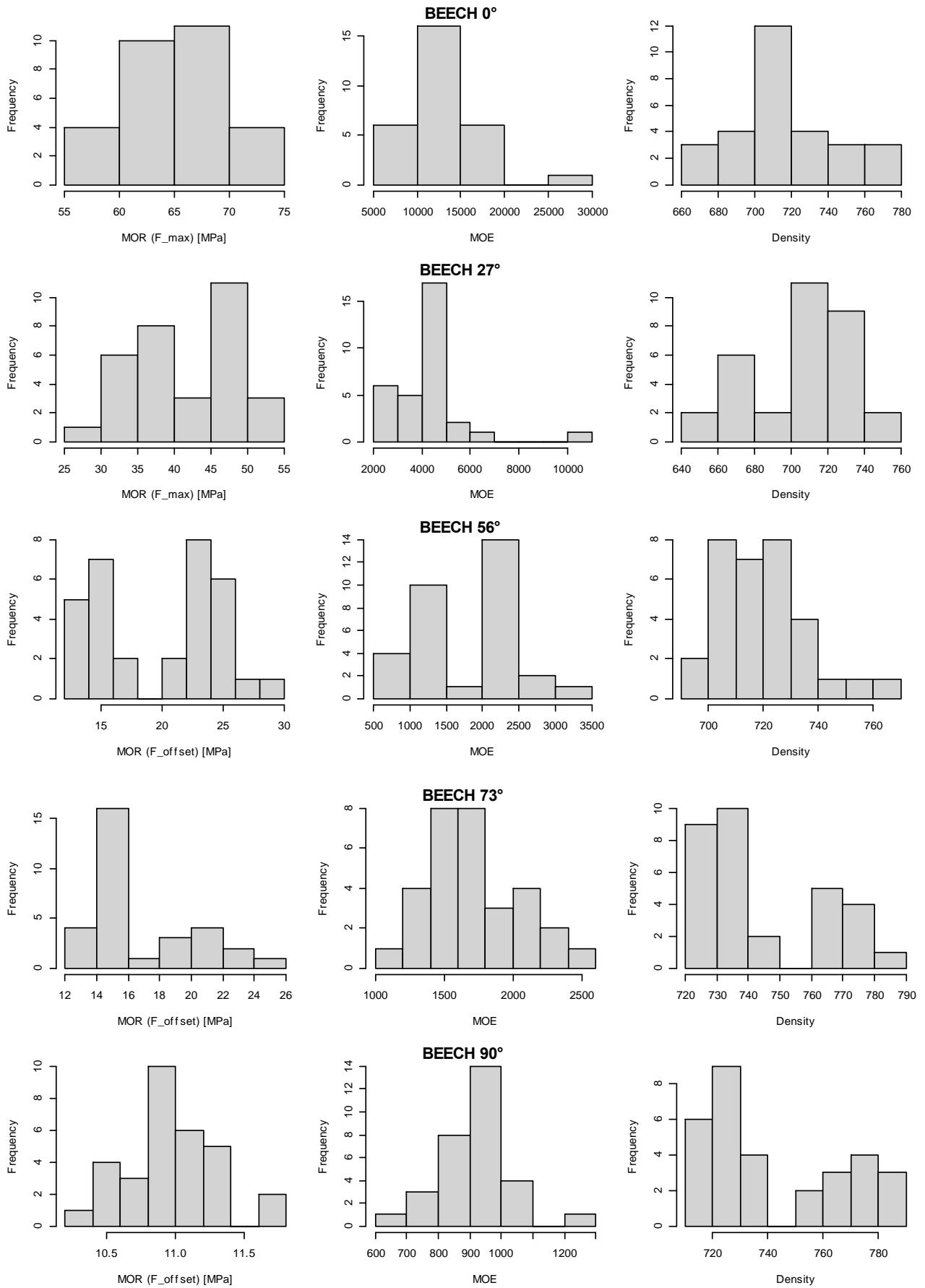
Références

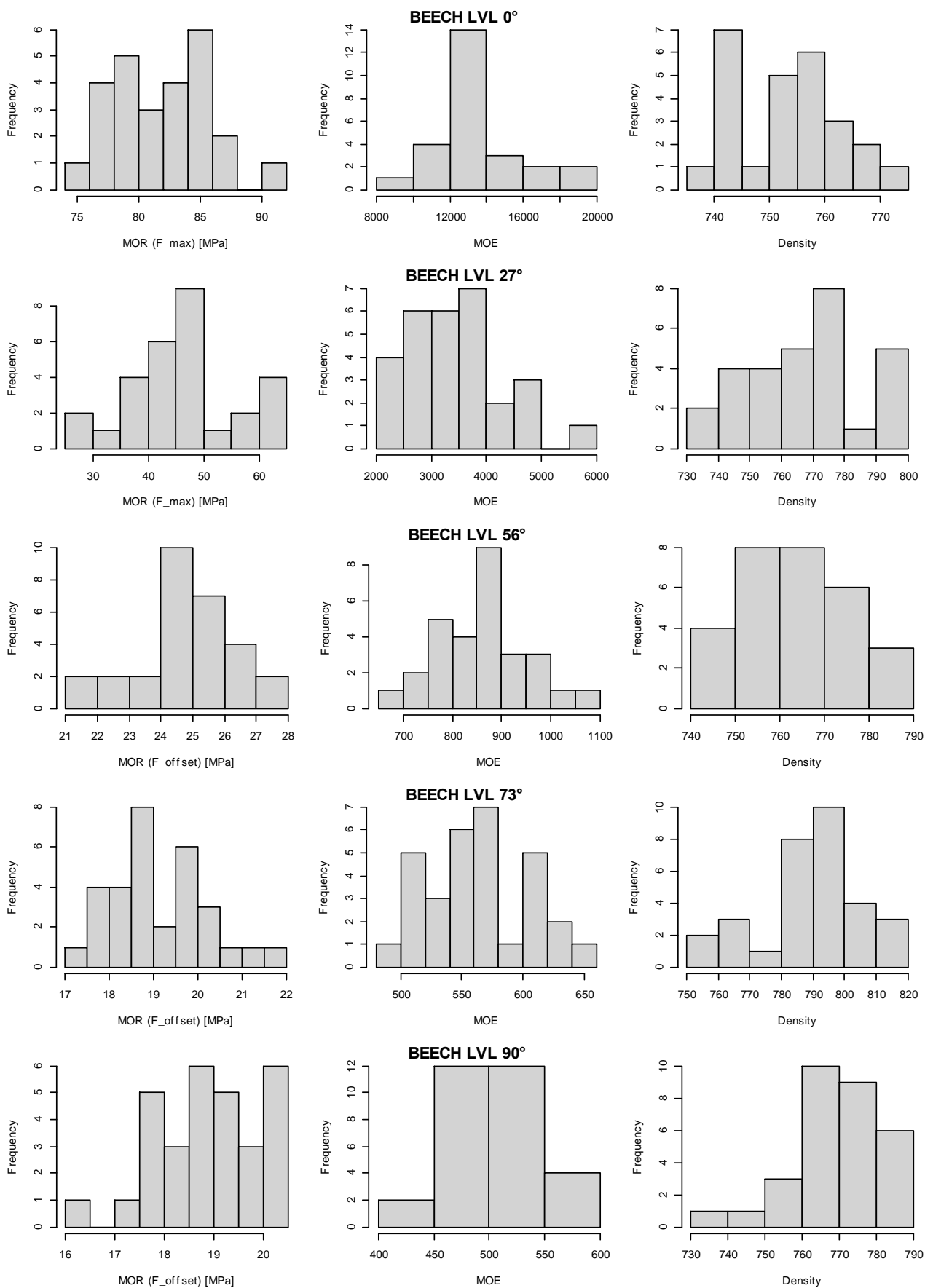
LVL_73_28	73	8,7%	787,98	15,43	10,64	8,86	2,20	3,26	0,02	11,03	10,61
LVL_73_29	73	10,6%	801,57	15,13	10,28	8,14	2,22	3,31	0,00	10,50	10,08
LVL_73_30	73	8,4%	785,94	15,06	11,74	9,43	2,01	3,23	-0,02	10,59	10,39
LVL_73_31	73	10,4%	808,41	15,22	10,99	8,91	2,59	3,00	-0,02	10,72	9,81
LVL_73_32	73	8,9%	810,81	16,05	12,65	10,15	2,41	3,14	0,01	11,22	10,62
LVL_90_01	90	5,9%	765,74	15,40	10,93	9,35	1,80	3,38	-0,02	11,35	11,32
LVL_90_02	90	5,9%	764,33	14,57	11,23	9,65	1,88	3,15	-0,01	10,82	10,55
LVL_90_03	90	6,0%	762,24	15,61	10,22	8,84	1,97	3,46	-0,02	11,35	11,03
LVL_90_04	90	5,7%	773,52	14,41	11,79	10,99	1,01	3,02	-0,02	11,86	12,52
LVL_90_05	90	6,0%	760,12	14,05	10,70	9,32	1,87	3,05	-0,03	10,42	10,27
LVL_90_06	90	5,9%	758,25	14,68	9,19	8,13	1,98	3,37	0,01	10,81	10,44
LVL_90_07	90	6,1%	766,20	15,38	10,25	8,75	2,07	3,35	-0,02	11,05	10,70
LVL_90_08	90	5,6%	774,49	15,94	10,58	9,08	2,55	3,08	0,02	11,68	10,94
LVL_90_09	90	5,6%	779,44	16,78	9,68	8,14	2,49	3,41	-0,02	12,06	11,36
LVL_90_10	90	5,5%	774,70	16,59	9,71	8,21	2,69	3,24	0,01	12,10	11,22
LVL_90_11	90	5,6%	783,03	16,18	10,20	9,07	2,58	3,13	0,02	12,27	11,52
LVL_90_12	90	5,7%	766,04	15,55	9,56	8,19	2,52	3,21	0,03	11,33	10,48
LVL_90_13	90	5,5%	759,34	15,63	9,67	8,24	3,11	2,86	0,00	11,61	10,26
LVL_90_14	90	5,5%	764,33	15,21	11,43	9,57	2,08	3,12	-0,03	10,96	10,79
LVL_90_15	90	5,5%	781,46	17,27	9,93	8,30	2,63	3,39	-0,02	12,30	11,61
LVL_90_16	90	5,6%	783,22	16,62	10,27	8,85	2,94	3,03	-0,01	12,15	11,10
LVL_90_17	90	5,7%	757,95	15,56	8,78	7,41	2,55	3,29	0,00	11,22	10,39
LVL_90_18	90	5,5%	763,24	15,01	10,43	8,77	2,08	3,25	-0,02	10,69	10,46
LVL_90_19	90	5,7%	770,10	16,54	9,76	8,22	3,07	3,14	-0,01	11,82	10,41
LVL_90_20	90	5,5%	782,70	16,64	10,47	8,92	2,53	3,21	-0,02	12,03	11,36
LVL_90_21	90	5,4%	771,20	16,06	9,35	8,02	2,49	3,37	0,01	11,59	10,79
LVL_90_22	90	5,6%	772,00	16,28	11,08	9,32	2,74	3,02	0,00	11,46	10,87
LVL_90_23	90	5,5%	769,39	16,13	10,66	9,26	2,82	3,00	0,01	11,70	10,72
LVL_90_24	90	5,4%	779,12	16,38	9,73	8,01	2,64	3,29	-0,02	11,40	10,74
LVL_90_25	90	5,6%	782,46	16,64	10,46	8,82	2,85	3,09	0,01	11,99	11,08
LVL_90_26	90	5,6%	771,49	15,54	9,50	7,96	2,45	3,27	-0,02	10,97	10,36
LVL_90_27	90	5,5%	786,38	16,27	10,03	8,36	2,79	3,11	-0,02	11,59	10,75
LVL_90_28	90	5,6%	760,52	15,19	9,35	7,65	2,69	3,08	-0,02	10,77	9,89
LVL_90_29	90	5,5%	749,98	15,18	9,68	8,07	2,40	3,23	0,00	10,70	10,13
LVL_90_30	90	5,1%	730,42	14,37	8,87	7,32	2,35	3,21	-0,04	9,93	9,31

Annexe D – Histogrammes

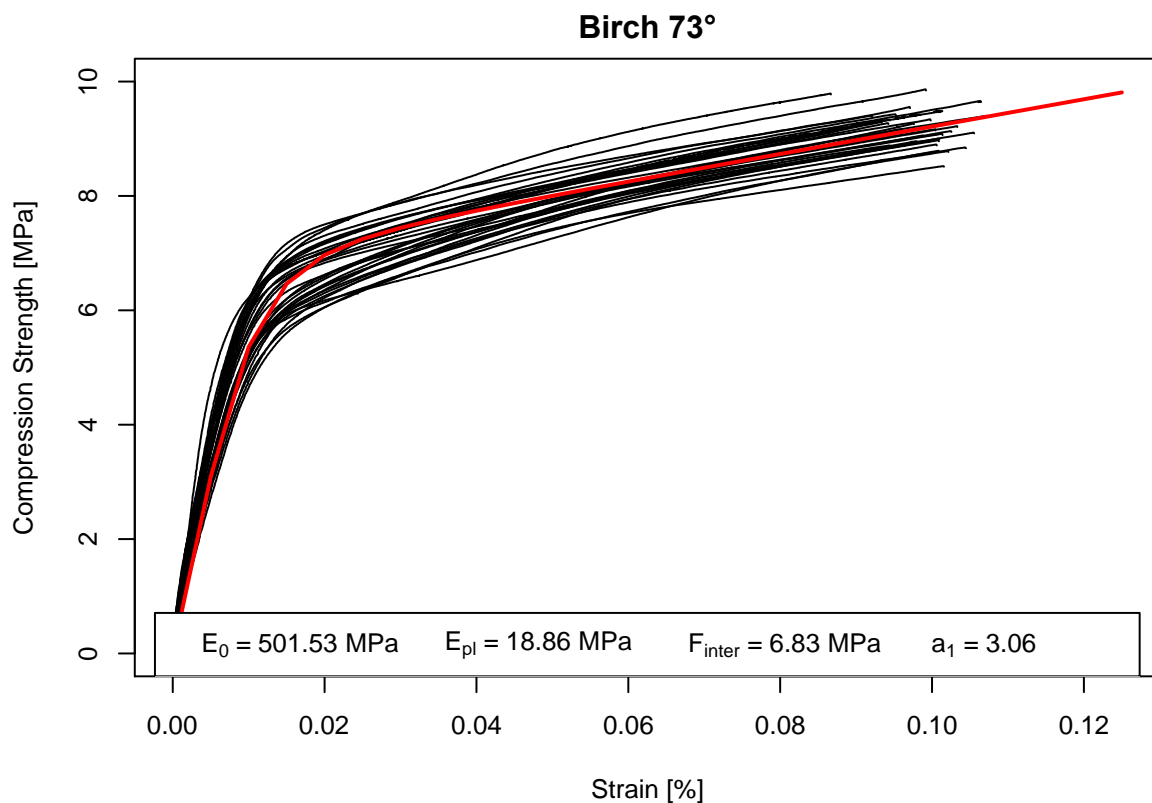
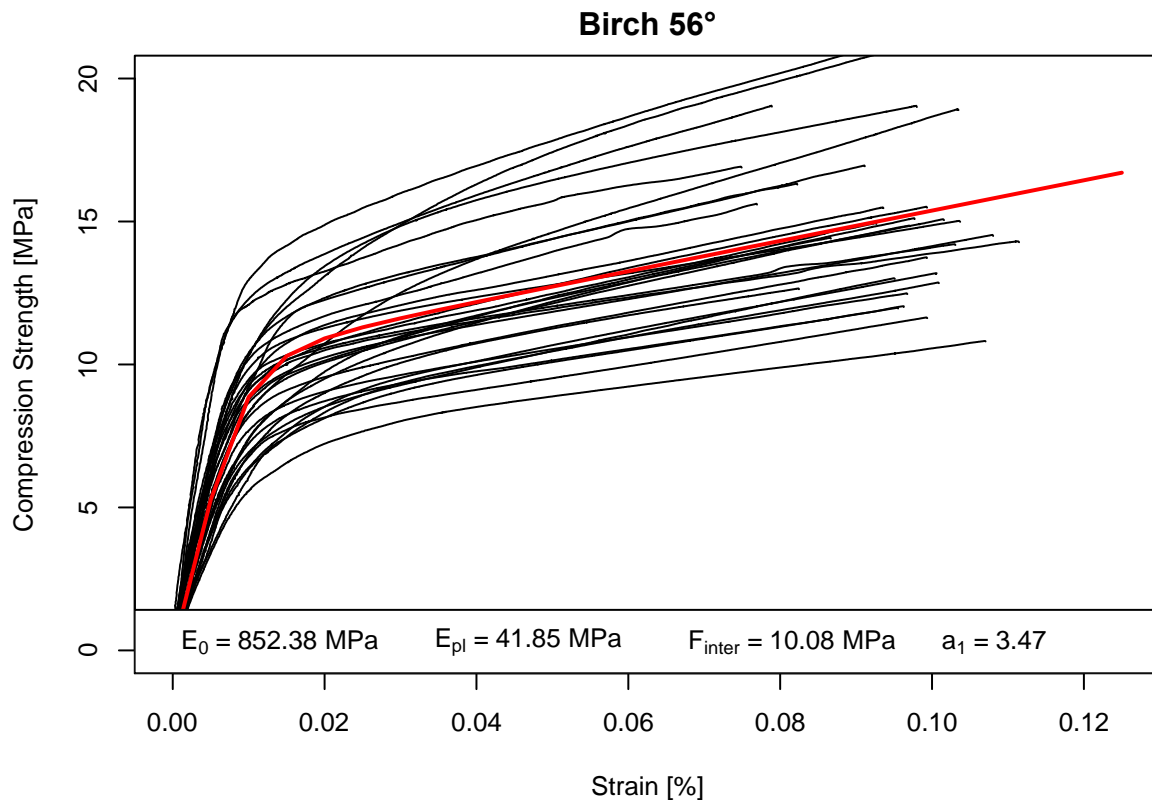


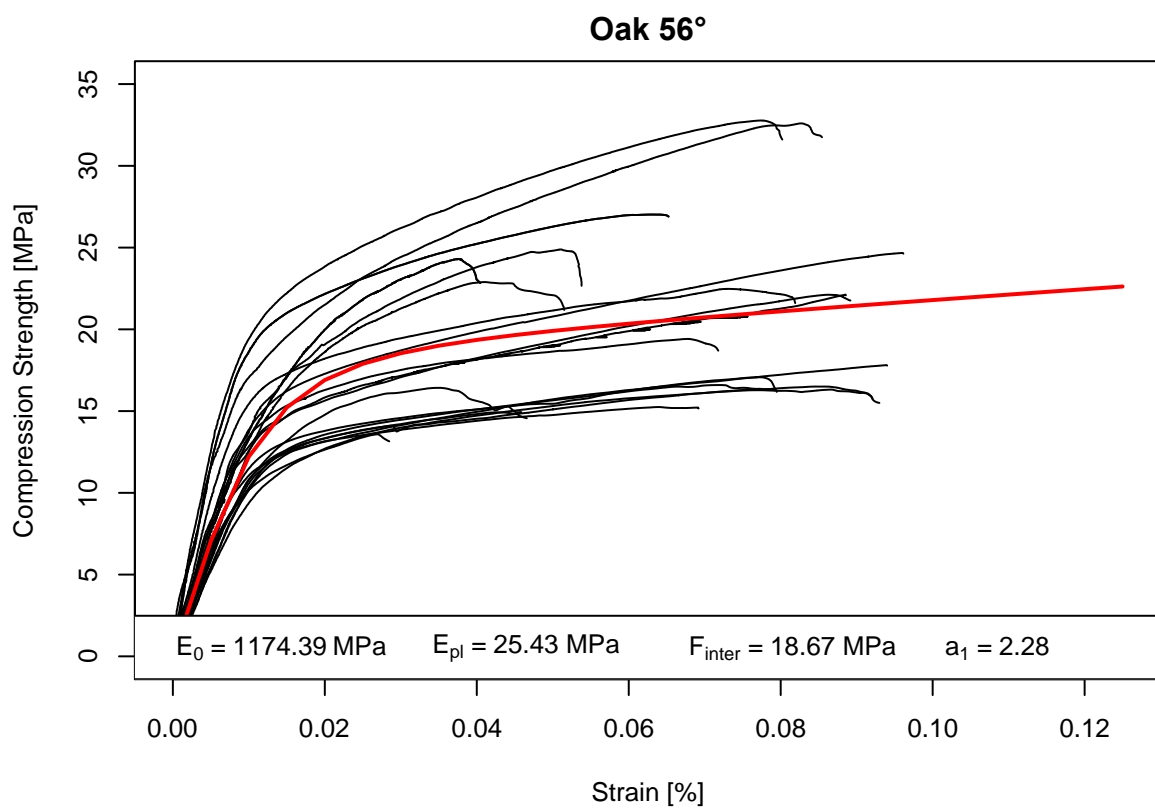
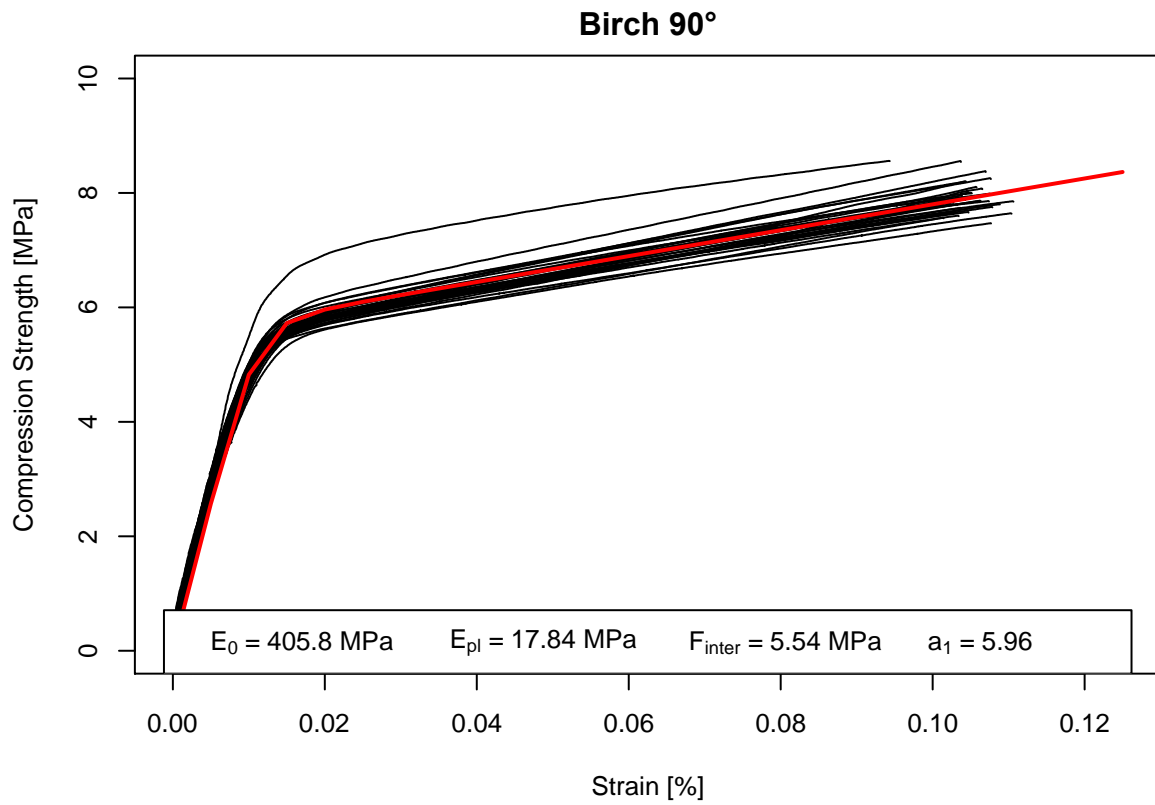




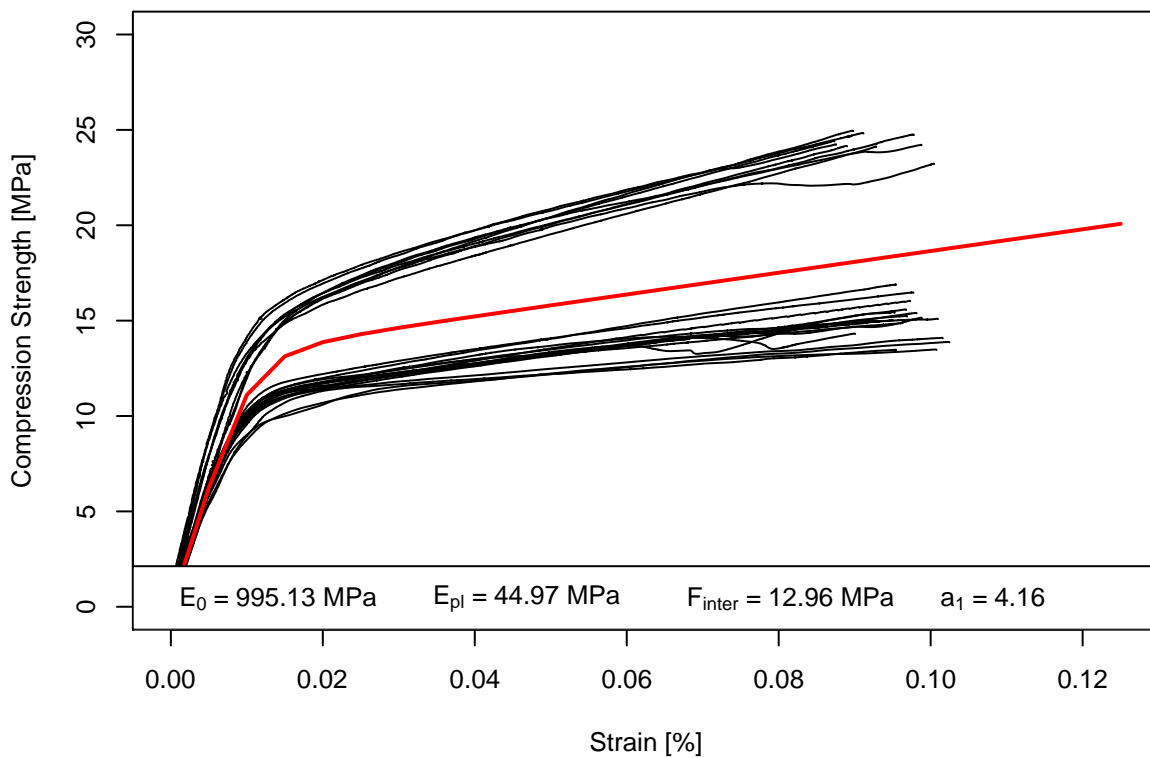


Annexe E - Courbes RICHARD ABBOTT

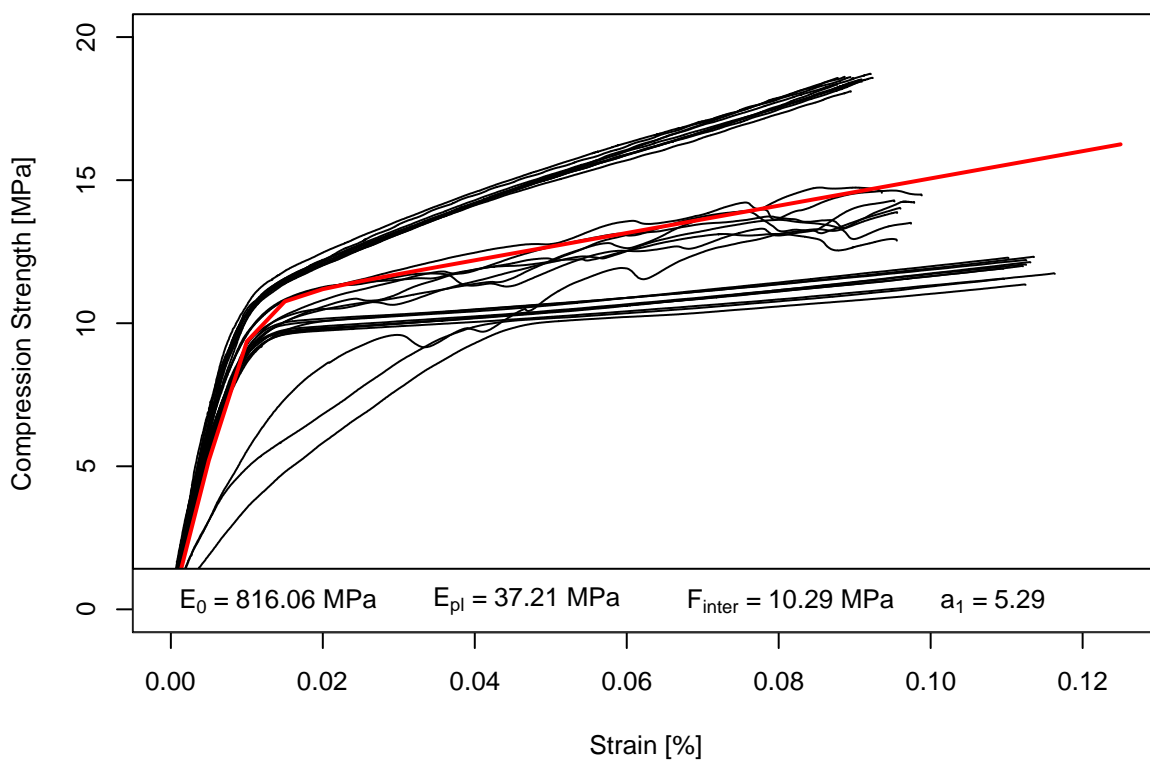


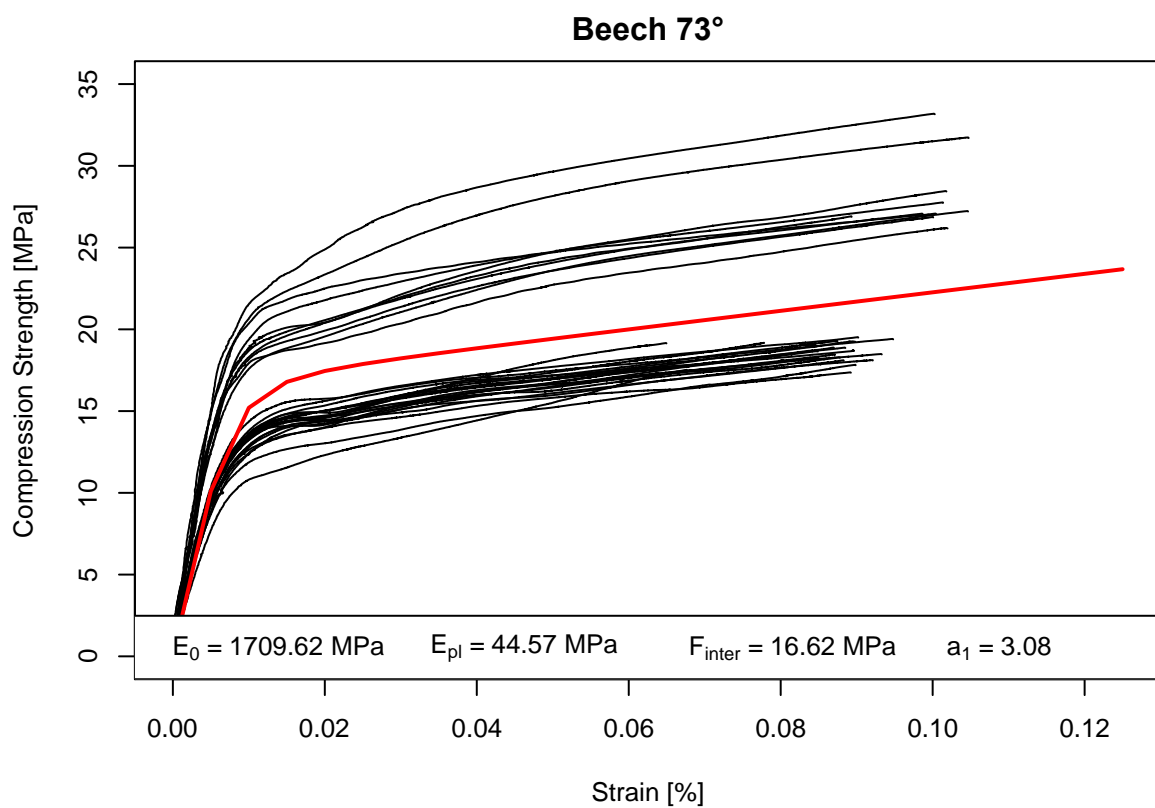
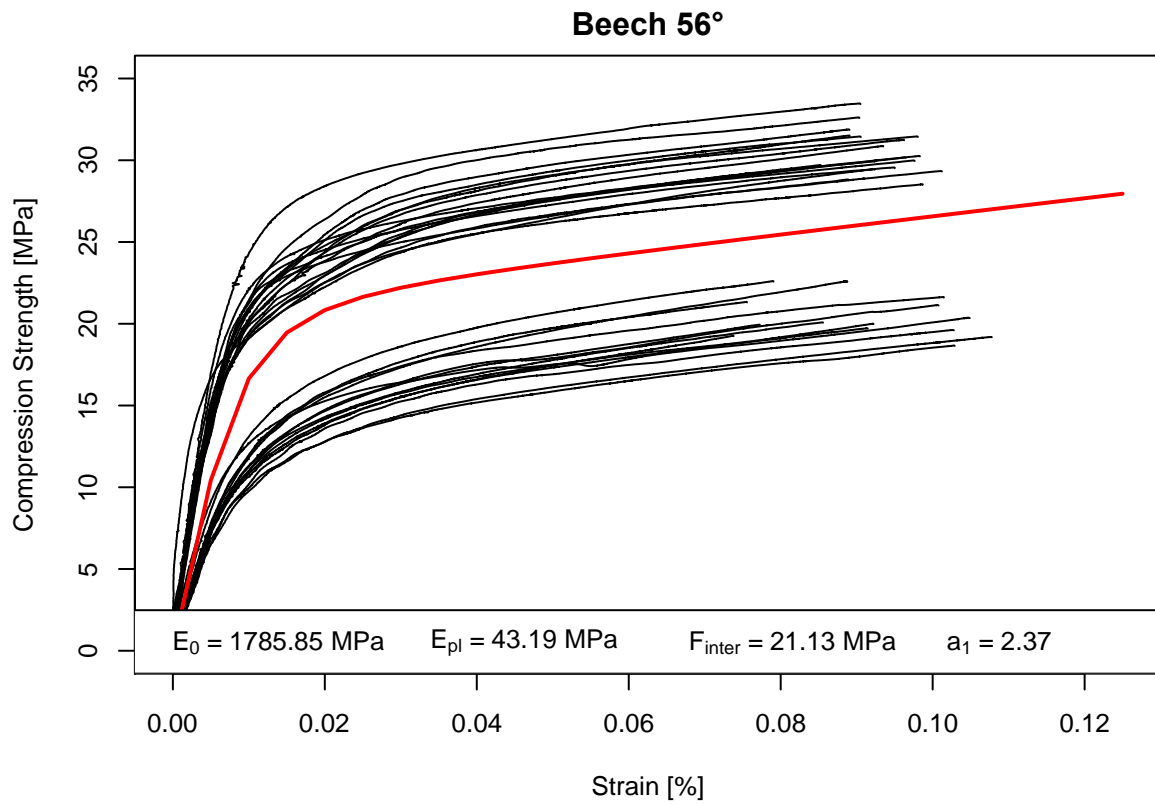


Oak 73°

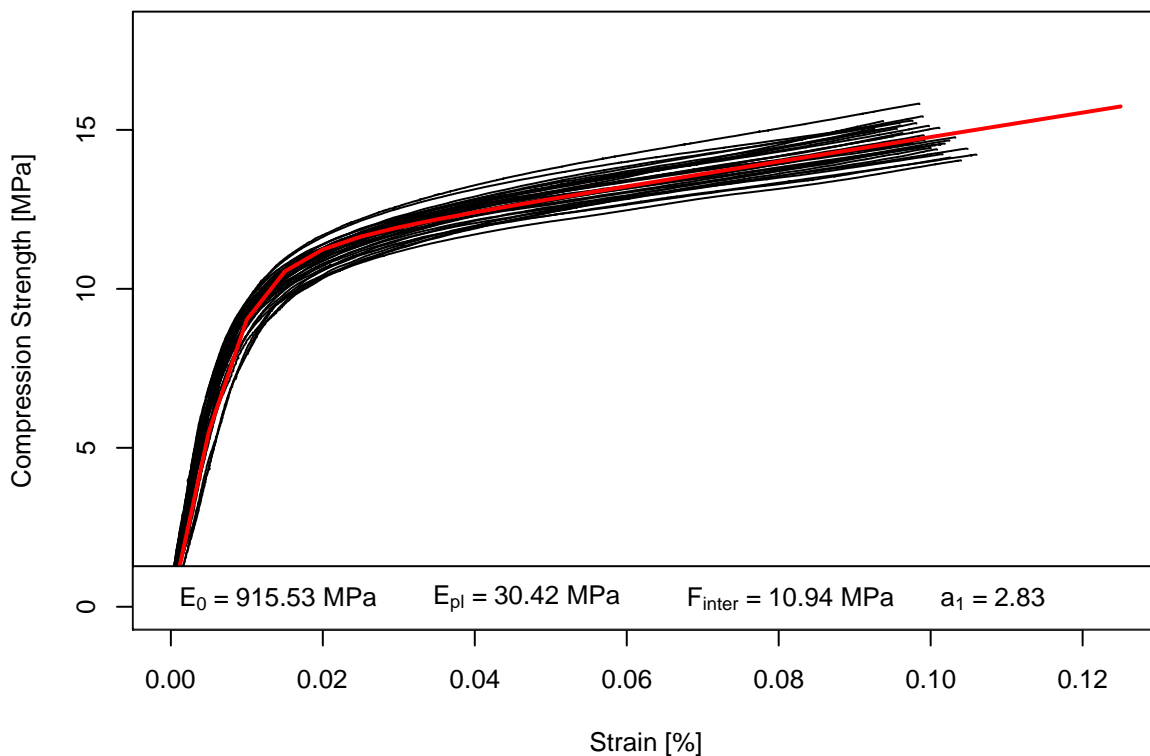


Oak 90°

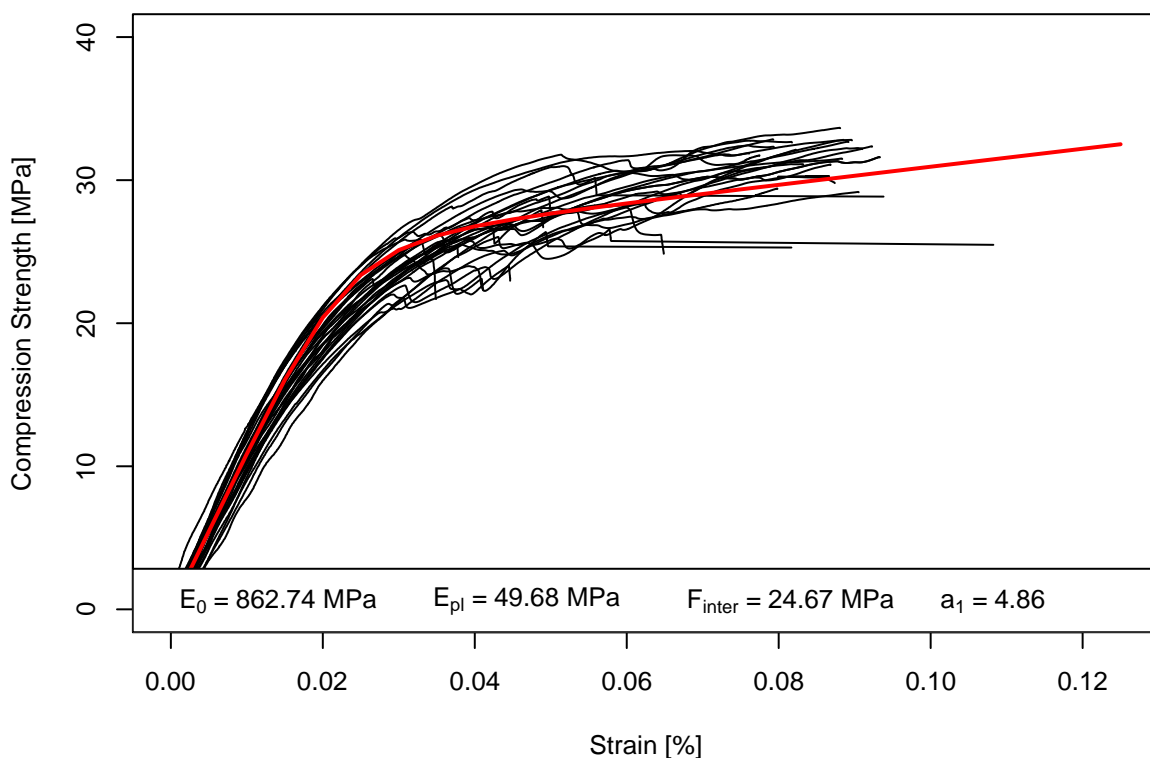


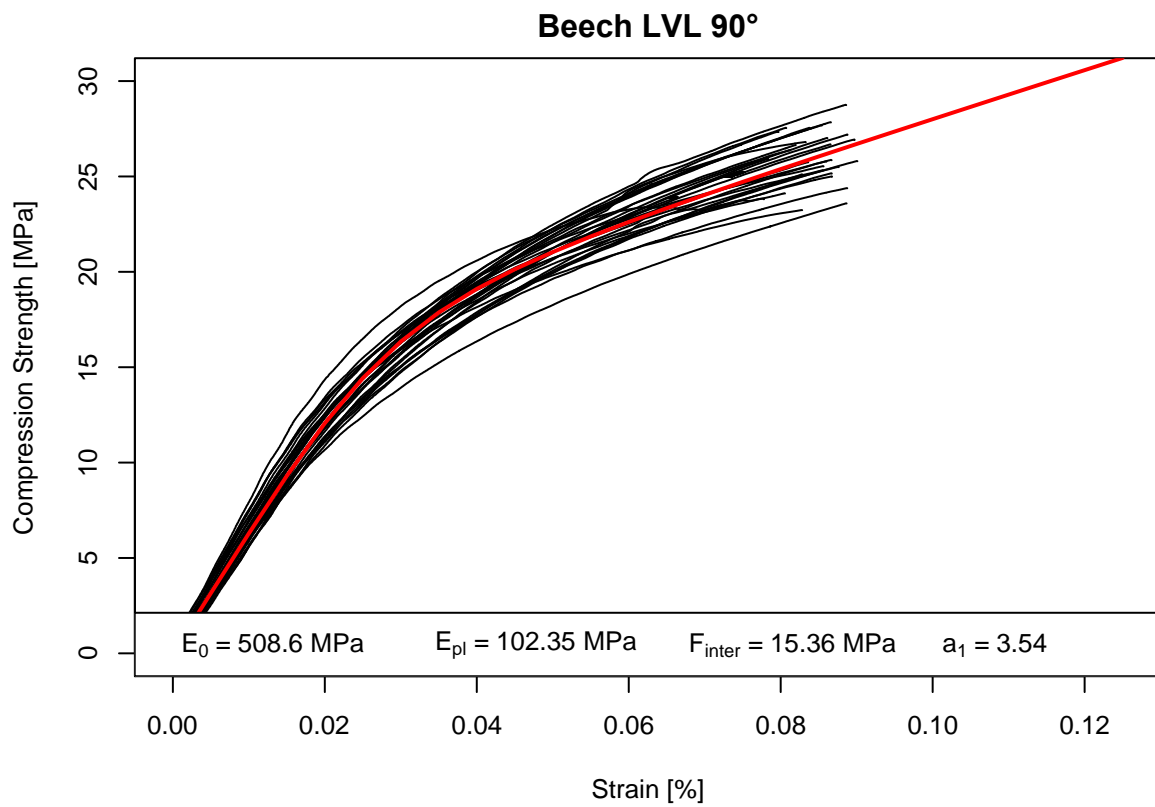
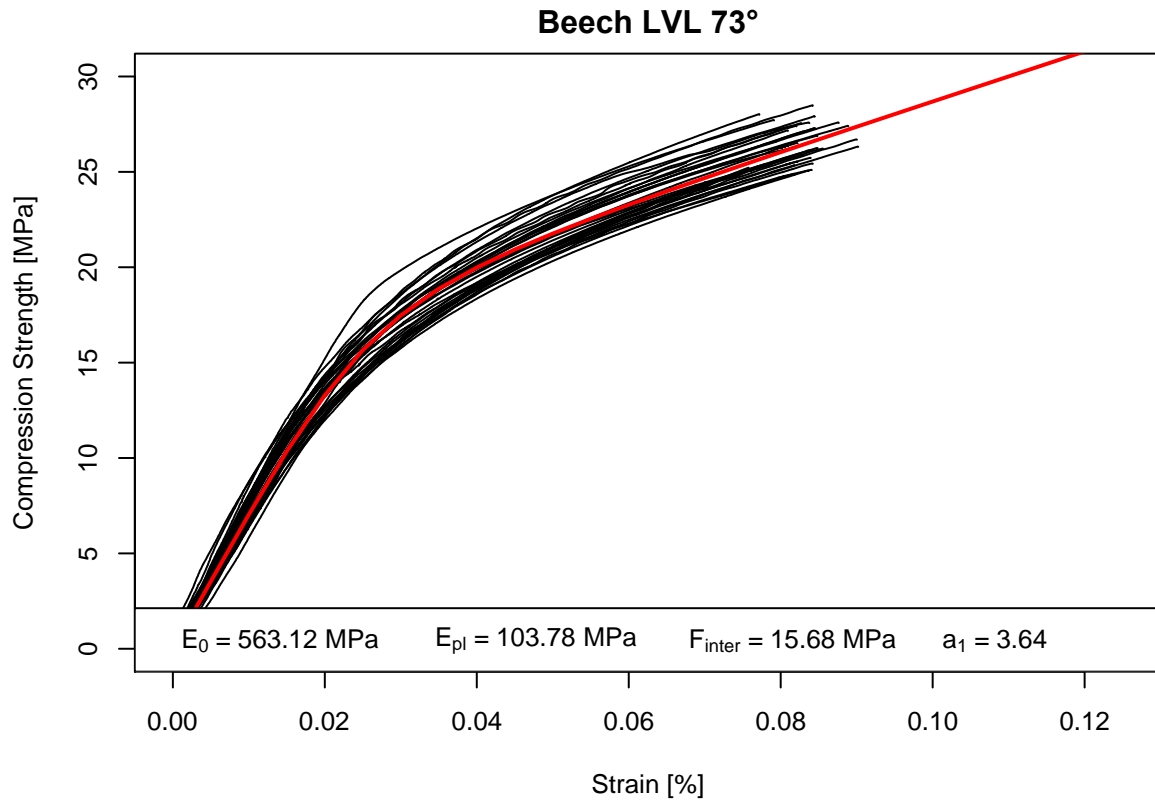


Beech 90°



Beech LVL 56°





4 Modélisation fragile des assemblages à entaille profonde Cast3M

WP4-T4.3 Modélisation emboîtement multiple

Cette partie présente l'étude de la rupture fragile d'un assemblage par emboîtement multiple. Pour cette étude, des essais ont été réalisés avec des assemblage par emboîtement en lamellé collé d'épicéa. Parallèlement, un modèle 2D mécanique élastique orthotrope en contraintes planes a été développé. Ce modèle fait appel à des éléments de type joints (modèle avec un adoucissement en cisaillement) pour modéliser cette rupture et donner la contrainte de cisaillement le long de ce joint. Le modèle est implémenté dans le code de calcul aux éléments finis Cast3M (version 2021), code développé au Département de Modélisation des Systèmes et Structures (DM2S) de la Direction de l'Énergie Nucléaire du Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA).

Une première partie présente le modèle développé avec de nombreux détails à propos du code de calcul. Ensuite, une deuxième partie présente les essais réalisés ainsi que la comparaison entre leurs résultats avec les simulations numériques. Enfin une dernière partie présente les étude paramétriques effectuée avec le modèle éléments finis.



Emboîtement multiple étudié au LERMAB

Sommaire

1	Présentation du modèle	3
1.1	Géométrie	2
1.2	Modèle et matériau	7
1.3	Modèle joint	8
1.4	Conditions limites et chargement	17
1.5	Calcul	22
1.6	Post-traitement : sorties	23
1.7	Calcul des excentricités	28
2	Modélisation des essais	34
2.1	Présentation des essais	35
2.2	Essais 30° - Validation du modèle	45
2.3	Autres essais	49
3	Études paramétriques	54
3.1	Appui sur axe neutre	56
3.2	Appui et débord d'appui variables	62
3.3	AC	
4	Conclusion	

1 Présentation du modèle

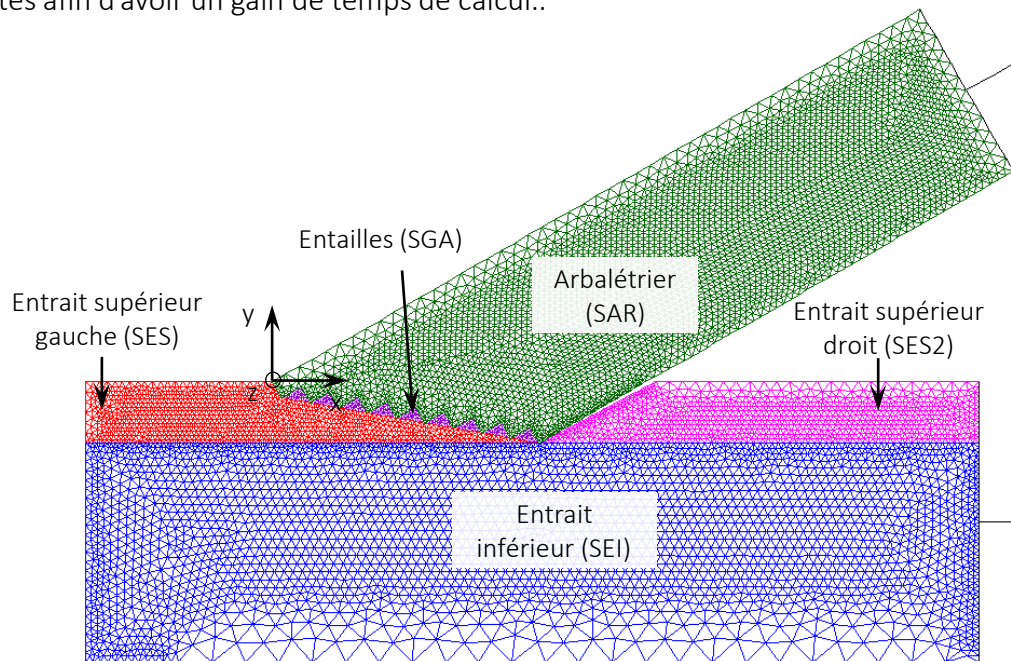
Pour l'ensemble du modèle le systèmes d'unité choisit est le suivant : mm, N et MPa.

1.1 Géométrie de l'assemblage

Les essais sont réalisés sur des fermes assemblées par emboîtement multiple, étant symétriques, seule la moitié gauche est modélisée.

L'assemblage étudié est constitué de deux pièces en bois : l'entrait et l'arbalétrier. Afin d'étudier le phénomène de rupture par cisaillement du talon, l'entrait est scindé en deux parties, nommées entrait supérieur (lui-même séparé en deux parties, gauche et droite) et entrait inférieur. Des éléments joints sont définis entre les parties supérieur et inférieur de l'entrait. De plus, le maillage des entailles de l'entrait est effectué séparément pour être ensuite ajouté à l'entrait supérieur gauche.

Seul l'assemblage est modélisé par un maillage 2D, le reste de l'entrait et de l'arbalétrier est représenté par deux barres ayant les sections correspondantes afin d'avoir un gain de temps de calcul..



Définitions des différents maillages 2D

1.1 Géométrie de l'assemblage

Définition des paramètres généraux

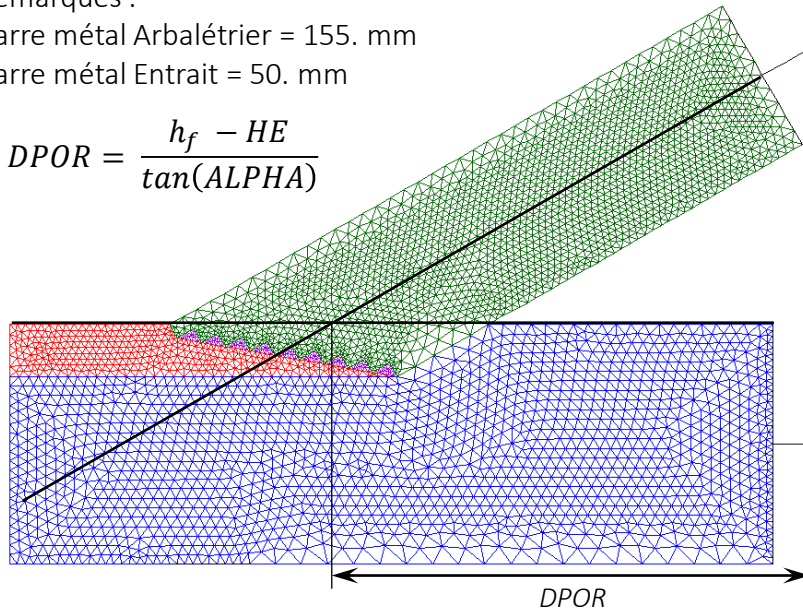
Définition	Cast3M	Valeur par défaut
Demi-portée de la ferme (intersection axe arba avec membrure haute entrait)	DPOR	606.22
Angle de l'arbalétrier	ALPHA	30
Hauteur de l'entrait	HE	300
Hauteur de l'arbalétrier	HA	200
Base de l'entrait	BE	100
Base de l'arbalétrier	BA	100
Longueur du talon	LTAL	200
Débord de l'appui	AAPP	0
Longueur de l'appui	LAPP	100

Remarques :

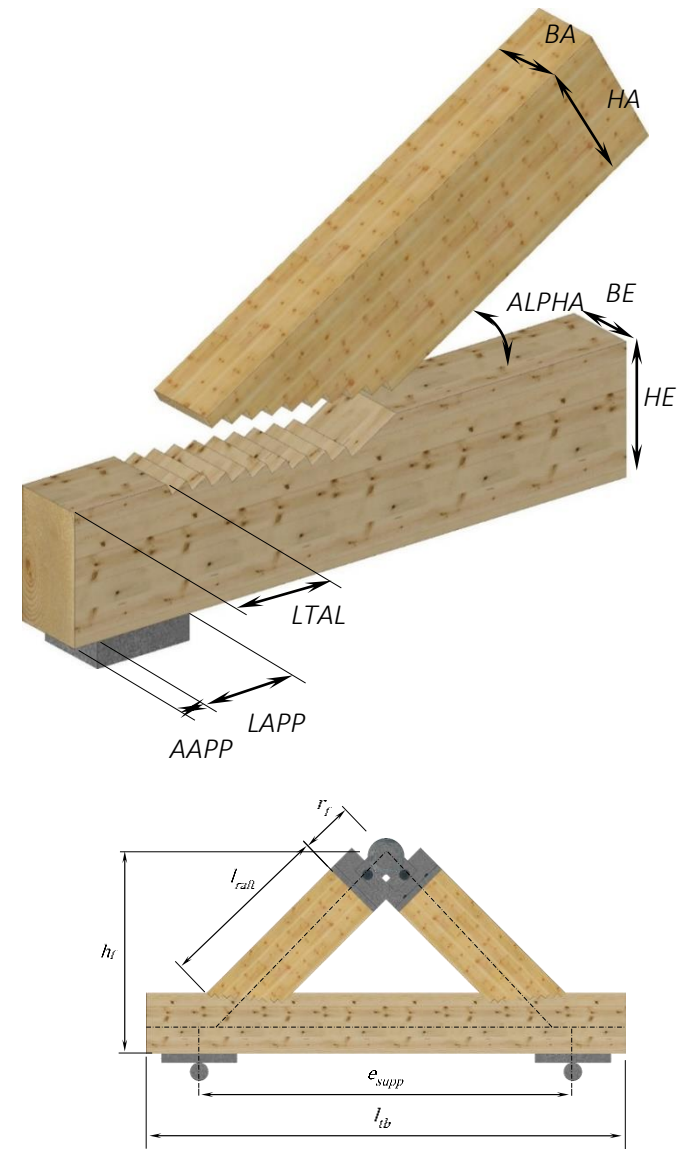
Barre métal Arbalétrier = 155. mm

Barre métal Entrait = 50. mm

$$DPOR = \frac{h_f - HE}{\tan(\text{ALPHA})}$$



Définition géométrique du paramètre DPOR

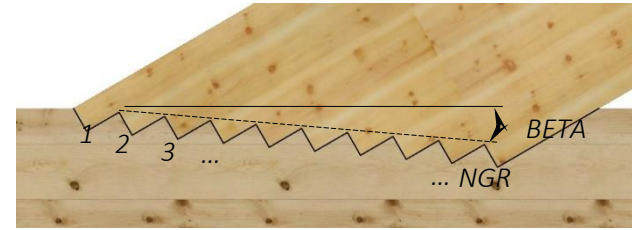


Définitions des paramètres géométriques

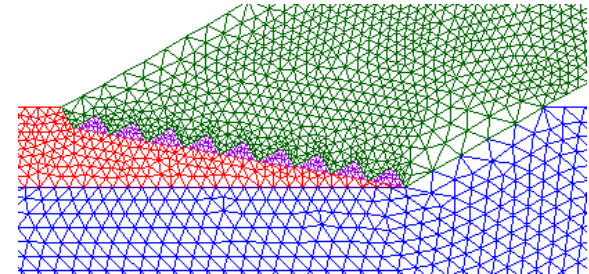
1.1 Géométrie de l'assemblage

Définition des paramètres des entailles

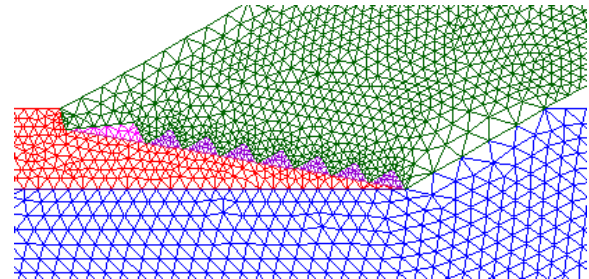
Définition	Cast3M	Valeur par défaut
Nombre d'entailles	NGR	10
Angle de progression des entailles	BETA	10
(Hauteur d'une entaille perp. à l'arba)	HN	HA / NGR



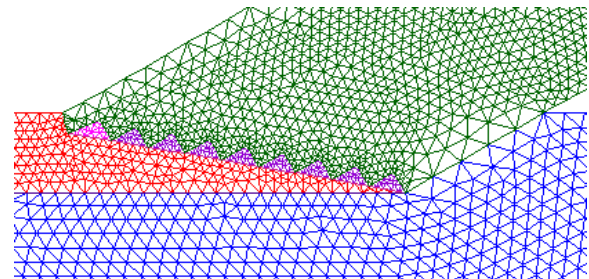
Entaille avant taillée a la bissectrice	TYPGA	NON
---	-------	-----



Entaille avant taillée a la bissectrice	TYPGA	OUI
Nombre d'entailles équivalentes à l'entaille avant	NGA	2



Entaille avant taillée a la bissectrice	TYPGA	OUI
Nombre d'entailles équivalentes à l'entaille avant	NGA	1



1.1 Géométrie de l'assemblage

Ajout d'un joint et d'un jeu

Définition	Cast3M	Valeur par défaut
Décalage point entrain inférieur et poutre métal (cause joint)	DCL_ENINF	0.1
Décalage point joint droit vs point joint gauche	DCL_ENSD	1.
Jeu arrière entaille : décalage point entrain supérieur droit vs arbalétrier	JEU_ENT	10.

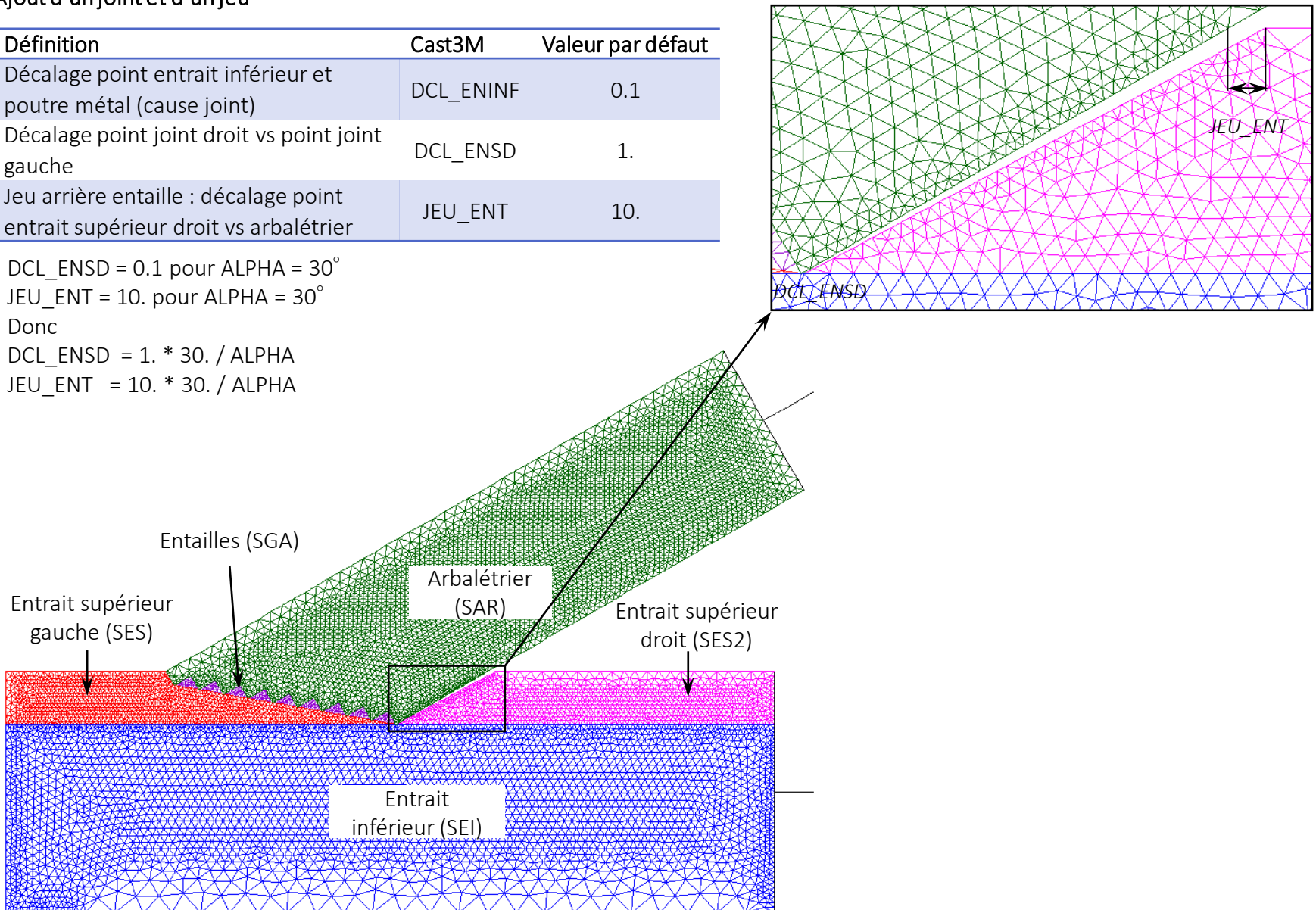
$DCL_ENSD = 0.1$ pour $ALPHA = 30^\circ$

$JEU_ENT = 10.$ pour $ALPHA = 30^\circ$

Donc

$DCL_ENSD = 1. * 30. / ALPHA$

$JEU_ENT = 10. * 30. / ALPHA$



1.2 Modèle et matériau

Les essais sont réalisés en résineux : lamellé-collé d'épicéa. Le modèle mécanique des éléments bois est un modèle élastique orthotrope sur des éléments de maillage TRI3 (direction 1 : L, direction 2 : T, direction 3 : R).

Les propriétés du LC d'épicéa sont issues de la norme NF EN 1194.

Les propriétés des bois de feuillus sont issues des travaux de thèse de Bensitand ainsi que du projet hardwood_joint.

Les propriétés du LVL de hêtre sont issues des données du fabricant Pollemeier (BauBuche Q).

Propriétés	1 : GL24h	3 : Hêtre	4 : LVL Hêtre	2 : Chêne	5 : Bouleau
E_0,mean	11 500	14 524	12 800	13 595	14 857
E_90,mean	300	886	2 000	760	674
G_mean	650	908	820	850	929
NU12(LT)	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
NU23(TR)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
NU13(LR)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
f_v,mean	4,65	12,38	10,34	9,40	9,40
f_c,90,mean	3,32	10,08	29,18	8,34	7,40

Pour les barres bois c'est un modèle élastique isotrope POUTRE sur des éléments de maillage SEG2.

'YOUN' : module d'Young

'NU ' : coefficient de poisson

'SECT' : section droite

'INRZ' : moment d'inertie par rapport à l'axe local Oz

'SECY' : section réduite a l'effort tranchant selon l'axe local

Les barres de liaisons et l'appui sont en acier afin de limiter leur déformation. Le modèle utilisé est un modèle élastique isotrope POUTRE sur des éléments de maillage SEG2.

Matériau	YOUN	NU	SECT	INRZ	SECY
Entrait	E_0,mean	NULT	BE*HE	BE*(HE**3)/12	2/3*BE*HE
Arbalétrier	E_0,mean	NULT	BA*HA	BA*(HA**3)/12	2/3*BA*HA
Barres de liaison	210 000	0,3	BA*HA	BA*(HA**3)/12	2/3*BA*HA
Appui	210 000	0,3	BE*HE	BE*(HE**3)/12	2/3*BE*HE

1.3 Modèle joint

Définition du modèle joint_soft

'JOINT_SOFT' : Modèle de joint avec critère de type Mohr-Coulomb et adoucissement en traction et cisaillement. L'écoulement se fait sans dilatance. (en 2D cont. planes, defo. planes)

```
MODJT2 = MODE JT1 'MECANIQUE' 'ELASTIQUE' 'PLASTIQUE' 'JOINT_SOFT' JOI2 ;  
MATJT2 = MATE MODJT2 'KS' KS 'KN' KN  
          'PNOR' PNOR 'CPLG' CPLG 'BETA' BETA  
          'SJCB' SJCB 'SJSB' SJSB 'SJT B' SJTB ;
```

- 'KS' : Raideur de cisaillement
- 'KN' : Raideur normal

- 'SJT B' : Relation contrainte normale - ouverture du joint en traction (type EVOLUTION - Valeur positive pour la traction)
- 'SJCB' : Relation contrainte normale - fermeture du joint en traction (type EVOLUTION - Valeur positive pour la traction)
- 'SJSB' : Relation contrainte de cisaillement - glissement en cisaillement pour une contrainte normale nulle (Type EVOLUTION)

- 'PNOR' : Position de la pointe (hypothétique) du cône
- 'BETA' : Paramètre contrôlant la décharge en cisaillement
- 'CPLG' : Définition des couplages

1.3 Modèle joint

Définition de la loi de cisaillement

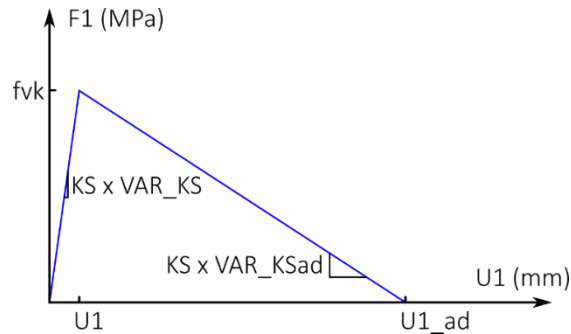
- 'KS' : Raideur de cisaillement

Caractéristique du bois : $f_{v,mean}$ et G_{mean}

Calcul de la raideur normal notée KS sur 1 x 1 mm du joint de hauteur 0,5 mm :

$$KS = \frac{GS}{l} = \frac{G_{mean} \times 1 \times 1}{0,5} \text{ en (N/mm)/mm}^2$$

- 'SJSB' : Relation contrainte de cisaillement - glissement en cisaillement pour une contrainte normale nulle
 - Adoucissement : $KS_{ad} = VAR_KSad \times KS$



$$U1_1 = \frac{f_v}{KS}$$

$$U1_{ad} = \frac{f_v}{KS_{ad}} + U1_1$$

U1	0.	$u1_1$	$u1_{ad}$	× BE
F1	0.	f_v	0.	

- 'BETA' : Paramètre contrôlant la décharge en cisaillement
BETA = 0.5 ;

1.3 Modèle joint

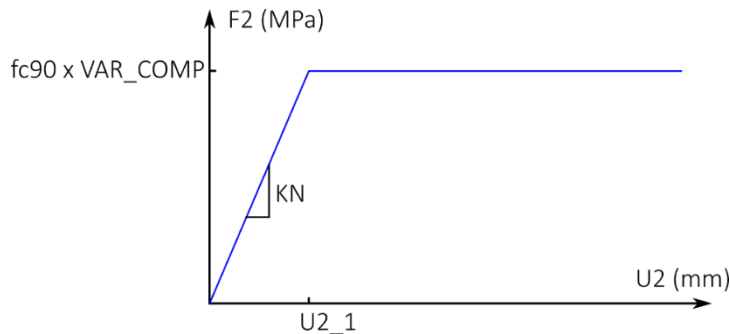
Définition de la loi de compression et de traction

- 'KN' : Raideur normal

Caractéristique du bois : $f_{c,90}$ et E_{90}

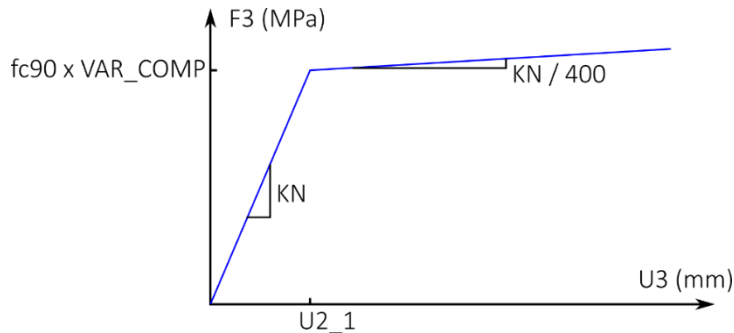
Calcul de la raideur normal notée KNc sur 1 x 1 mm du joint de hauteur 0,5 mm : $KN_c = \frac{ES}{l} = \frac{E_{90} \times 1 \times 1}{0,5}$ en (N/mm)/mm²

- 'SJT'B' : Relation contrainte normale - ouverture du joint en traction (U2 ; F2)



U2	0.	U2_1	U2_2	
F2	0.	fc90	fc90	× BE

- 'SJC'B' : Relation contrainte normale - fermeture du joint en traction (U3 ; F3)



$$U3_1 = \frac{f_{c,90}}{KN_c}$$

$$F3_2 = (0.4 - ui_1) \frac{KN_c}{400} + f_{c,90}$$

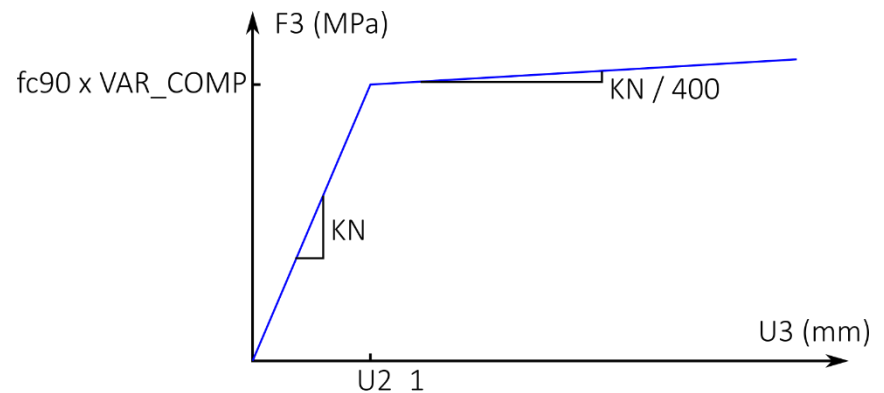
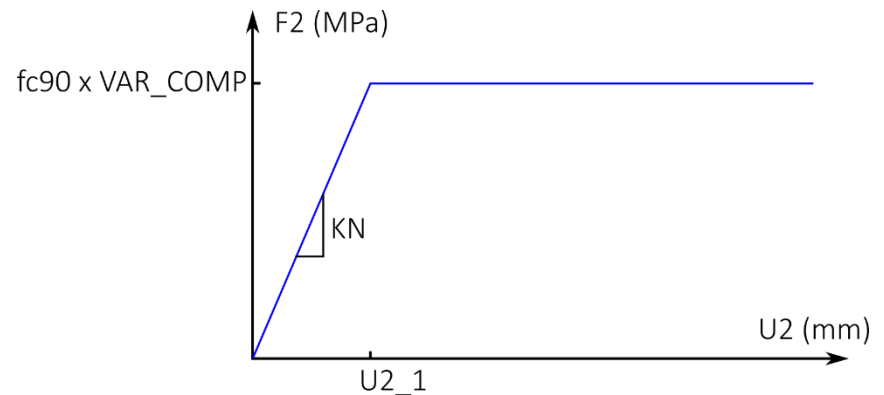
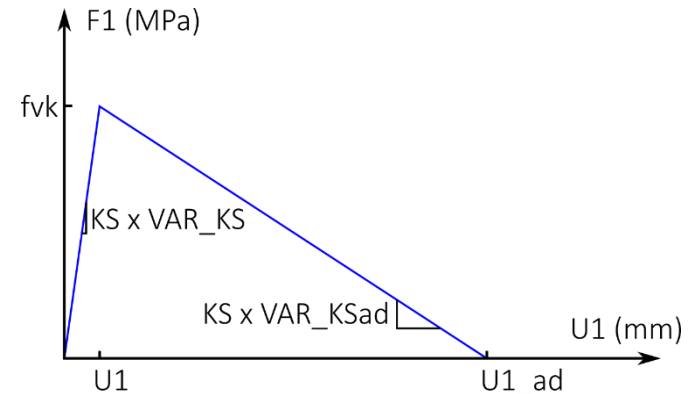
U3	0.	U2_1	U3_1	
F3	0.	fc90	F3_2	× BE

- 'PNOR' : Position de la pointe (hypothétique) du cône
PNOR = -1 * (MAXI Fc_90)
- 'CPLG' : Définition des couplages
Même KN pour la compression et la traction : CPLG = 0. ;

1.3 Modèle joint

Étude de sensibilité - Ajout de variables dans le programme

- Définition de 'KS' : Raideur de cisaillement
 → Raideur de cisaillement variable (VAR_KS)
 $KS = 1300. * BE * VAR_KS ;$
- Définition de 'KN' : Raideur normal : $KN = 600. * BE ;$
- Définition 'SJSB' : loi de cisaillement
 $SJSB = EVOL 'MANU' 'U1' U1 'SJSB' F1 ;$
 Contrainte de cisaillement (MPa) x la largeur de l'entrait
 $fvk = 5.5 ;$
 $F1 = PROG 0. fvk 0. ;$
 $F1 = F1 * BE ;$
 Déplacements (mm)
 → Pente de l'adoucissement variable (VAR_KSad)
 $U1_1 = fvk / (KS / BE) ;$
 $U1_ad = fvk / (VAR_KSad * KS / BE) + U1_1 ;$
 $U1 = PROG 0. U1_1 U1_ad ;$
- Définition de 'SJTb' : Loi de traction
 $SJTb = EVOL 'MANU' 'U2' U2 'SJTb' F2 ;$
 Contrainte de traction (MPa) x la largeur de l'entrait
 → Seuil de compression variable (VAR_COMP)
 $fc90 = 5. * VAR_COMP ;$
 $F2 = PROG 0. fc90 fc90 ;$
 $F2 = F2 * BE ;$
 Déplacements (mm)
 $U2_1 = fc90 / (KN / BE) ;$
 $U2 = PROG 0. U2_1 +0.4 ;$
- Définition de 'SJCB' : Loi de compression
 $SJCB = EVOL 'MANU' 'U3' U3 'SJCB' F3 ;$
 Contrainte de compression (MPa) x la largeur de l'entrait
 $F3_2 = (0.4 - U3_1) * KN / BE / 400. + fc90 ;$
 $F3 = PROG 0. fc90 F3_2 ;$
 Déplacements (mm)
 $U3 = PROG 0. U2_1 +0.4 ;$

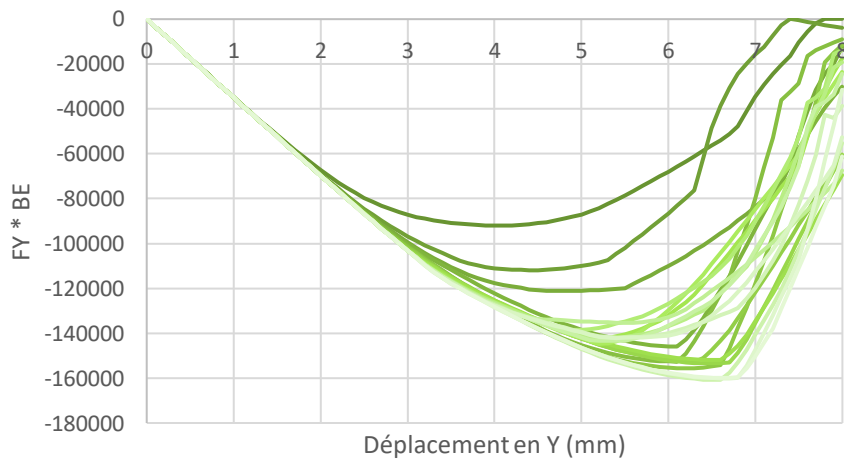


1.3 Modèle joint

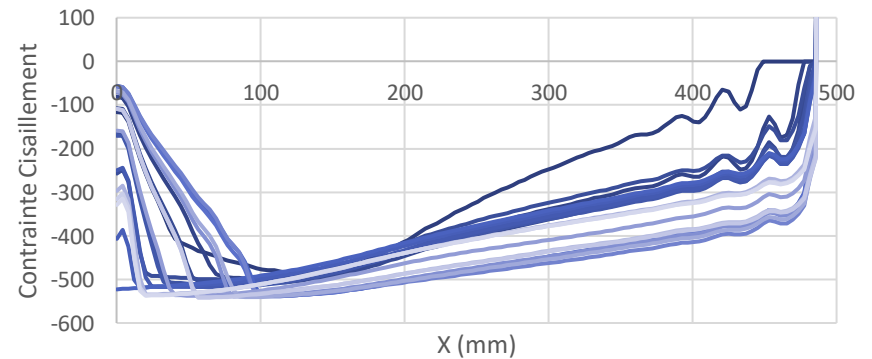
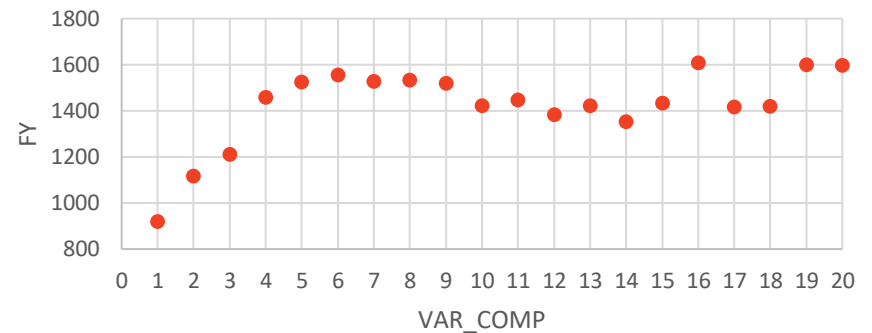
Étude de sensibilité

Un étude de sensibilité a été réalisée afin d'étudier l'impact des paramètres des lois de comportement mécanique du joint : la raideur de cisaillement KS, la raideur de cisaillement pour la phase d'adoucissement KS_Ad et le seuil maximum de compression SIGMA_MAX. Les données matériaux sont celles du LC d'épicéa, les paramètres pour la géométrie, les conditions limites et le chargement sont ceux des essais à 30° en LC d'épicéa. Les propriétés par défaut du joint sont :

- VAR_KS = 1.
 - VAR_KSad = 0.001
 - SIG_cs_max = 1555 * BE
- Influence de fc90 soit SIGMA_MAX
VAR_COMP de 1 à 20



FY_1 FY_2 FY_3 FY_4 FY_5
FY_6 FY_7 FY_8 FY_9 FY_10
FY_11 FY_12 FY_13 FY_14 FY_15
FY_16 FY_17 FY_18 FY_19 FY_20



SMSN_1 SMSN_2 SMSN_3 SMSN_4 SMSN_5
SMSN_6 SMSN_7 SMSN_8 SMSN_9 SMSN_10
SMSN_11 SMSN_12 SMSN_13 SMSN_14 SMSN_15
SMSN_16 SMSN_17 SMSN_18 SMSN_19 SMSN_20

1.3 Modèle joint

Étude de sensibilité

- Influence de f_{c90} soit SIGMA MAX

La figure ci-dessous est issue de la thèse de [Tavakoli 2011], elle présente la résistance au cisaillement en fonction de la contrainte de traction perpendiculaire au fil. Les données expérimentales issues des travaux de [Krüger] montrent que la résistance au cisaillement est très rapidement affectée lorsqu'une contrainte de traction perpendiculaire au fil est appliquée. Les résultats de la modélisation sont issues des travaux de thèse de [Tavakoli 2011].

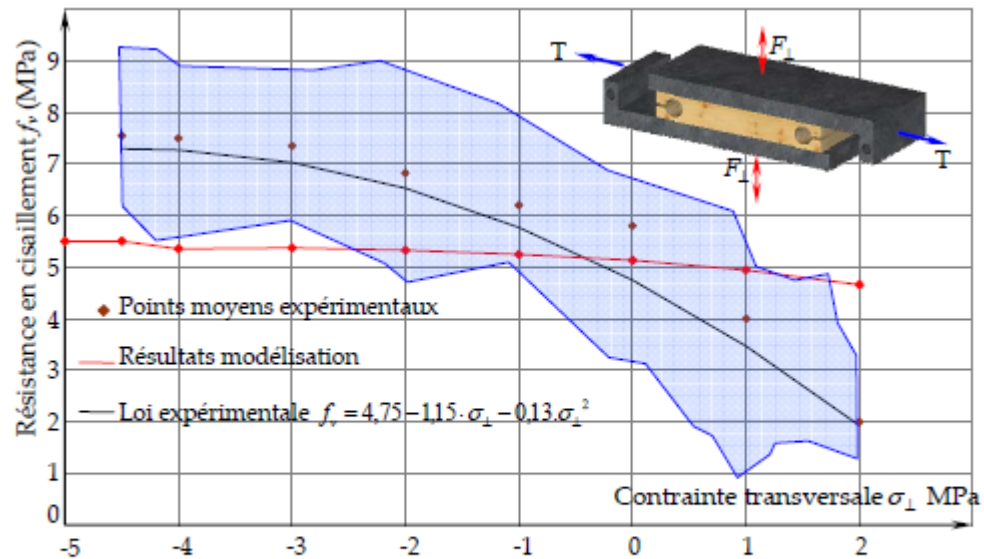


Figure 94 : Courbe d'interaction de la résistance en cisaillement sous l'effet de la contrainte transversale (épicéa $\rho \approx 430 \text{ kg/m}^3$). Krüger [54].

Dans le cas de la compression, c'est-à-dire lorsque la contrainte de traction perpendiculaire au fil est négative, la résistance en cisaillement augmente selon les données expérimentales. Néanmoins, cette augmentation ne sera pas prise en compte dans le modèle développé pour les assemblage à emboîtement à pas multiple. En effet, il existe très peu de travaux sur ce phénomène et ne pas inclure cette influence place notre modèle du côté de la sécurité. Ainsi, le seuil de compression est augmenté jusqu'à ce que son influence sur la résistance en cisaillement soit supprimée, pour la suite des calculs VAR_COMP est égal à 6.

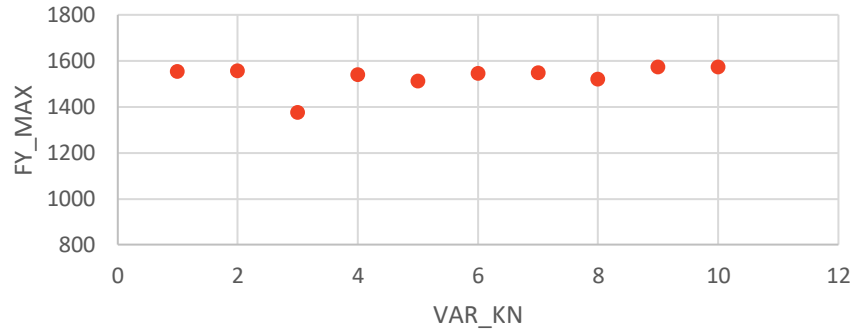
1.3 Modèle joint

Étude de sensibilité

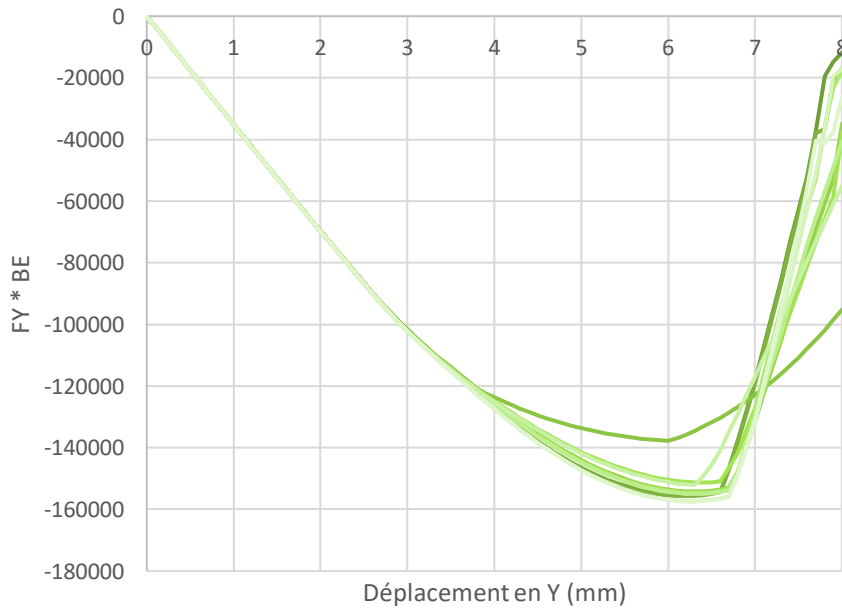
- Influence de KN

VAR_KN de 1 à 10

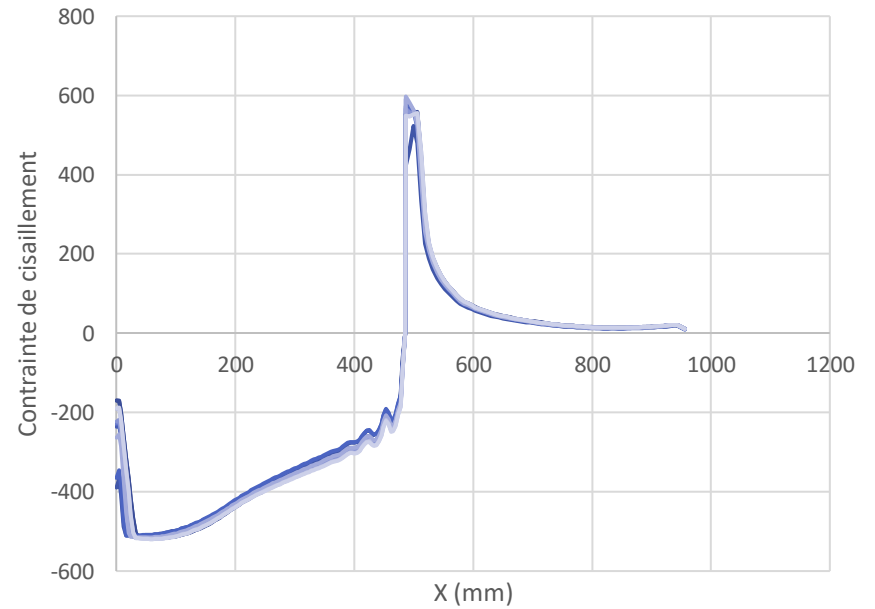
VAR_COMP = 6.



Peu d'influence → VAR_KN = 1.
pour la suite des calculs



— FY_1 — FY_2 — FY_3 — FY_4 — FY_5
— FY_6 — FY_7 — FY_8 — FY_9 — FY_10

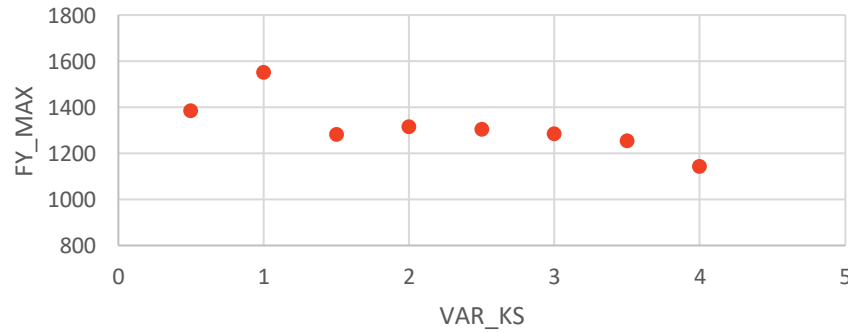


— SMSN_1 — SMSN_2 — SMSN_3 — SMSN_4 — SMSN_5
— SMSN_6 — SMSN_7 — SMSN_8 — SMSN_9 — SMSN_10

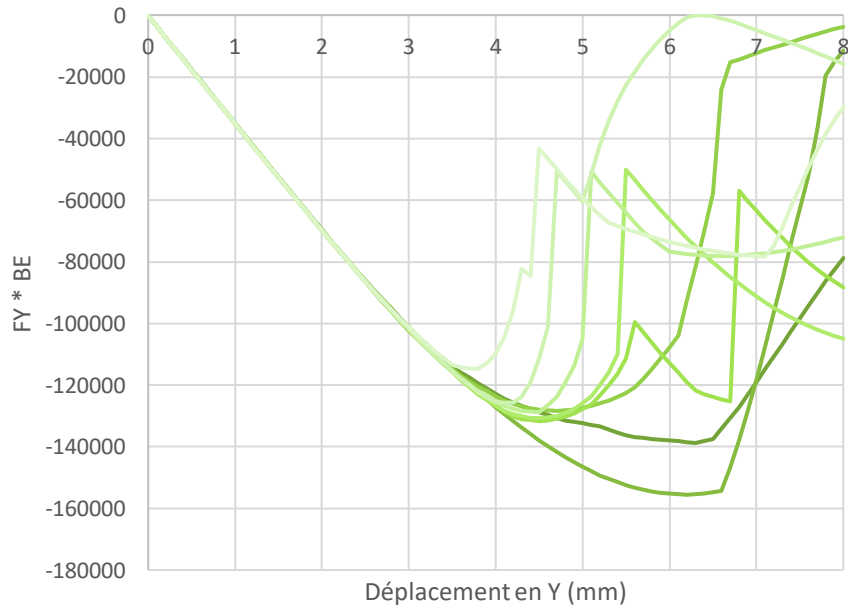
1.3 Modèle joint

Étude de sensibilité

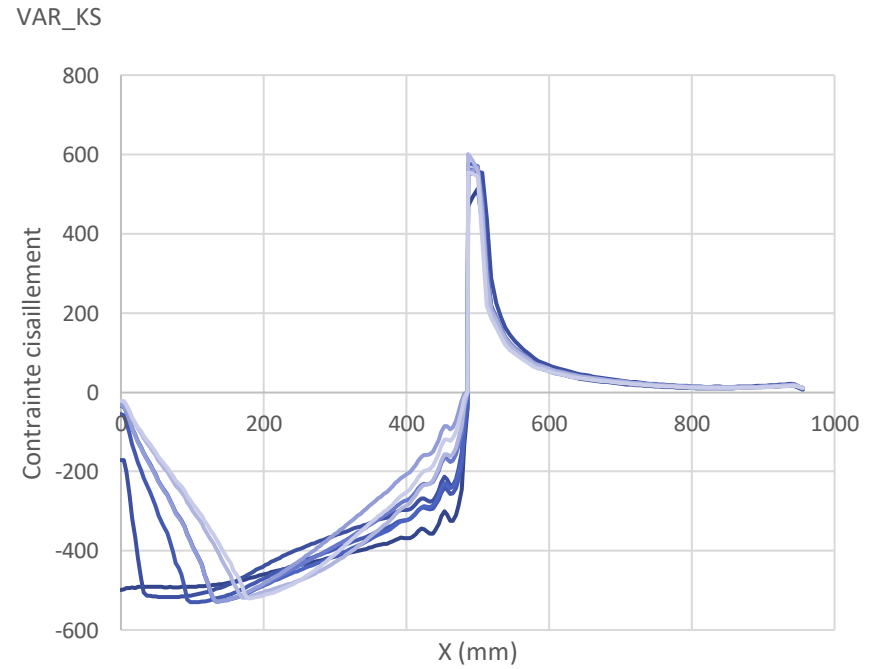
- Influence de KS :
VAR_KS de 0,5 à 4
VAR_COMP = 6.
VAR_KN = 1.



Peu d'influence → VAR_KS = 1.
pour la suite des calculs



— FY_0.5 — FY_1 — FY_1.5 — FY_2
— FY_2.5 — FY_3 — FY_3.5 — FY_4



— SMSN_0.5 — SMSN_1 — SMSN_1.5 — SMSN_2
— SMSN_2.5 — SMSN_3 — SMSN_3.5 — SMSN_4

1.3 Modèle joint

Étude de sensibilité

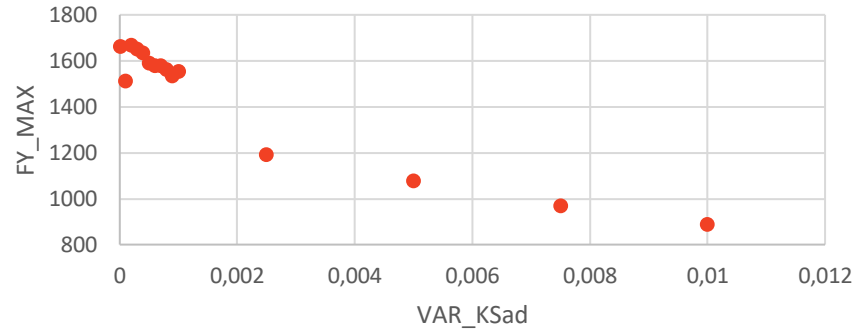
- Influence de KS_ad :

VAR_KSad de 0,00001 à 0.01

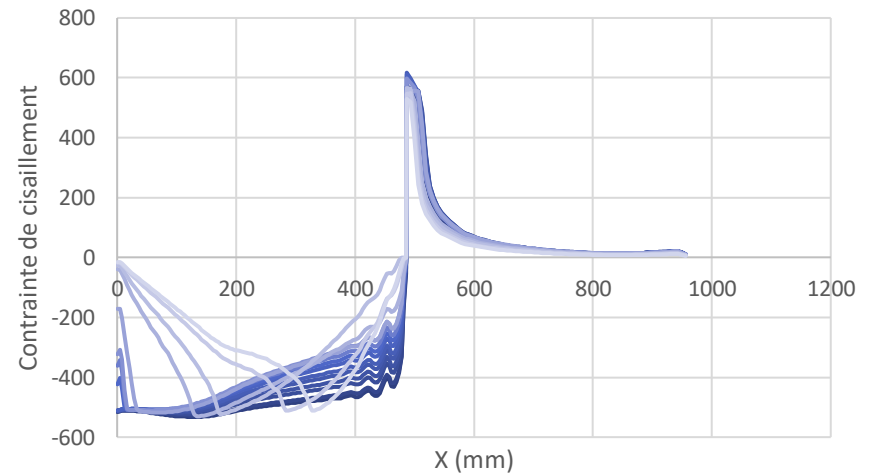
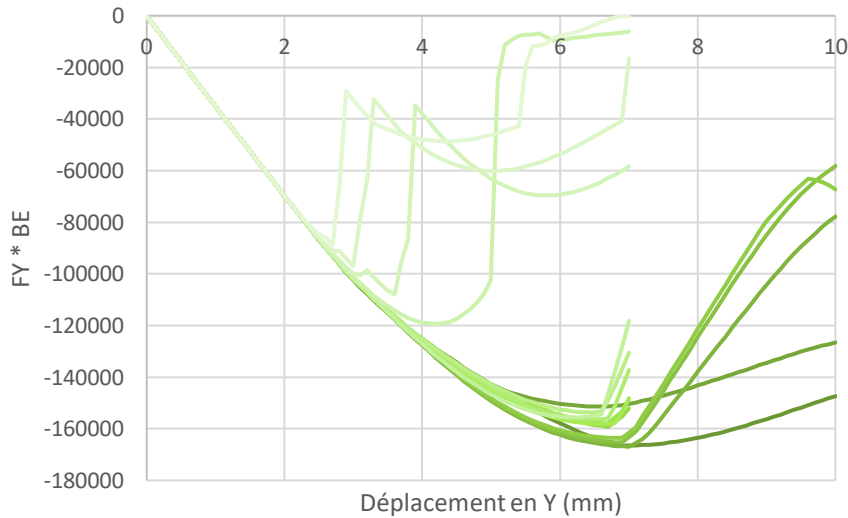
VAR_COMP = 6.

VAR_KN = 1.

VAR_KS = 1.



→ VAR_KS_ad = 0.001
pour la suite des calculs



— FY_0.00001 — FY_0.0001 — FY_0.0002 — FY_0.0003
— FY_0.0004 — FY_0.0005 — FY_0.0006 — FY_0.0007
— FY_0.0008 — FY_0.0009 — FY_0.0010 — FY_0.0025
— FY_0.005 — FY_0.0075 — FY_0.01

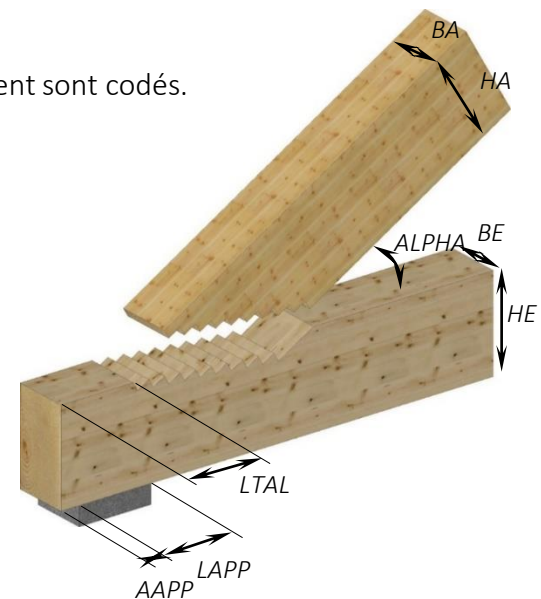
— SMSN_0.00001 — SMSN_0.0001 — SMSN_0.0002
— SMSN_0.0003 — SMSN_0.0004 — SMSN_0.0005
— SMSN_0.0006 — SMSN_0.0007 — SMSN_0.0008
— SMSN_0.0009 — SMSN_0.0010 — SMSN_0.0025
— SMSN_0.005 — SMSN_0.0075 — SMSN_0.01

1.4 Conditions limites et chargement

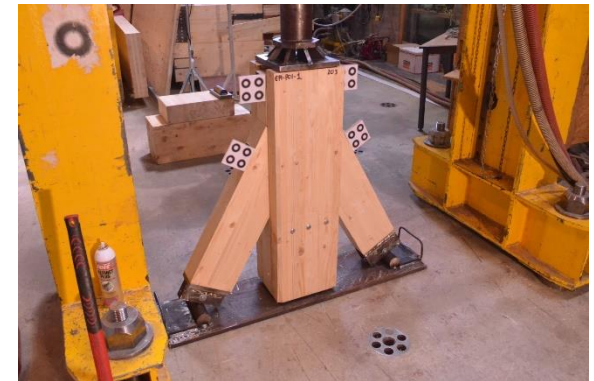
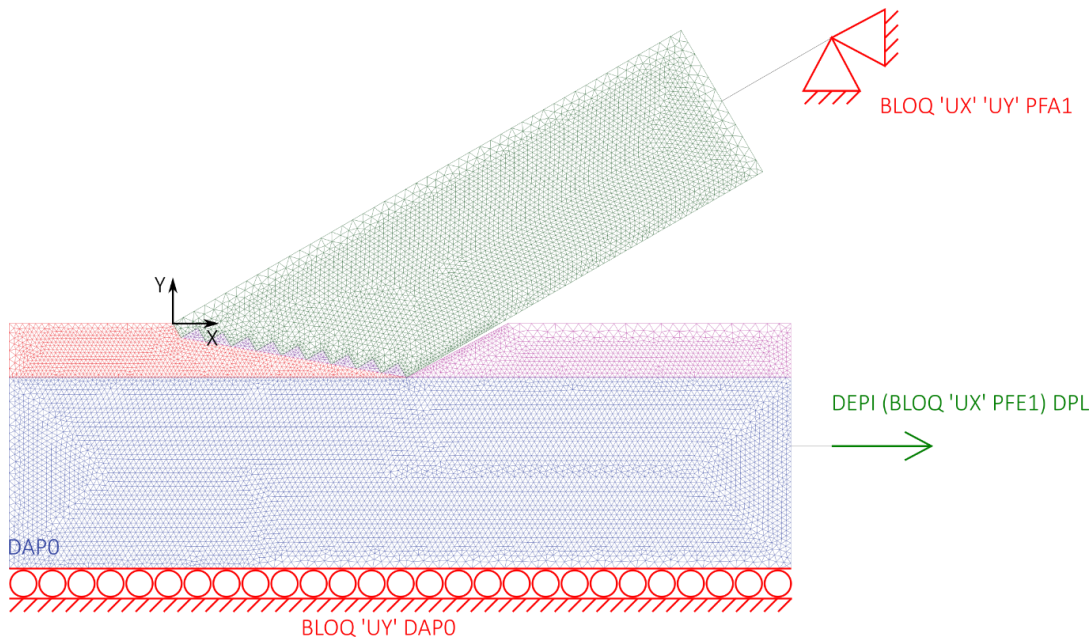
Afin d'étudier différentes configurations plusieurs type de conditions limites et de chargement sont codés.

Type poinçon

- Rappel sur la géométrie de l'appui
 - * **LTAL** : Longueur du talon
 - * **LAPP** : Longueur de l'appui
 - * **AAPP** : Débord de l'appui
- Option 1 : essai poinçon ou pied arbalétrier
 - * Variable pour option : **VAR_APPUI = 1**
 - * Définition d'un débord par défaut : **AAPP = 10.** ;
 - * Chargement : déplacement sur X (en vert sur la figure ci-dessous)
 - * Blocage des déplacements en X et Y au point PFA1 de l'arbalétrier
 - * Blocage des déplacements sur Y sur la droite DAP0 de l'entrait



Définitions des paramètres géométriques

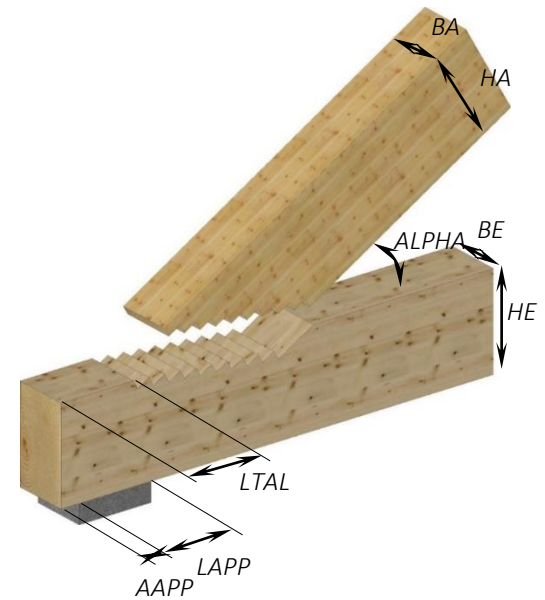
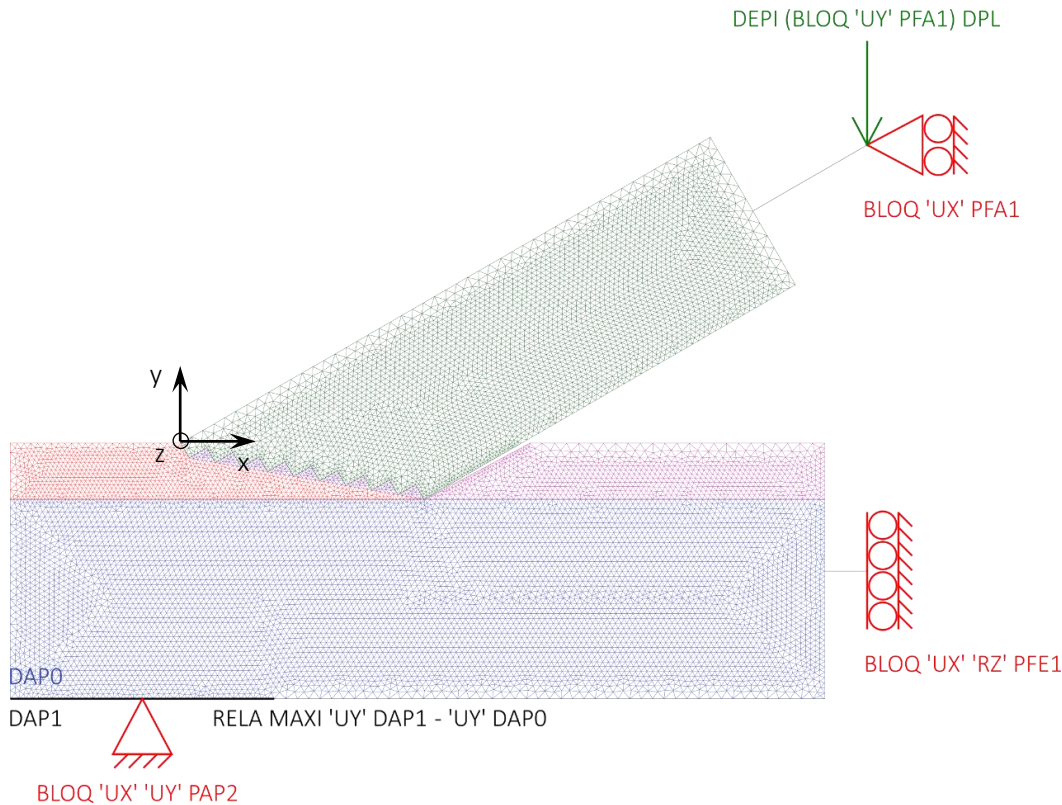


Essais type poinçon en épicea

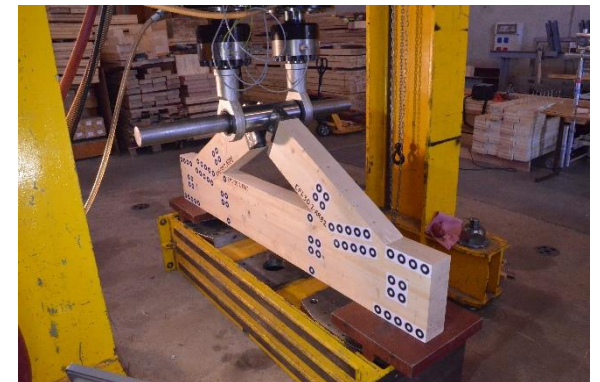
1.4 Conditions limites et chargement

Type appui avec débord

- Option 2 : Appui avec débord
 - * $VAR_APPUI = 2$
 - * $AAPP = 0.$; (débord de l'appui à définir)
 - * Chargement : déplacement sur Y (en vert sur la figure ci-dessous)
 - * Blocage des déplacements en X au point PFA1 de l'arbalétrier
 - * Blocage des déplacements sur X du point PFE1 de l'entrait
 - * Blocage des rotations selon Z du point PFE1 de l'entrait
 - * Blocage des déplacements sur X et Y du point PAP2 de l'entrait



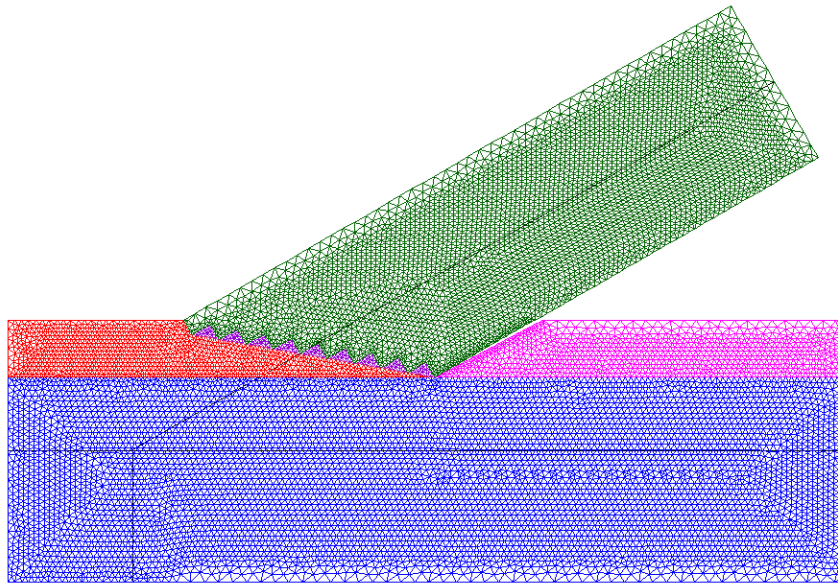
Définitions des paramètres géométriques



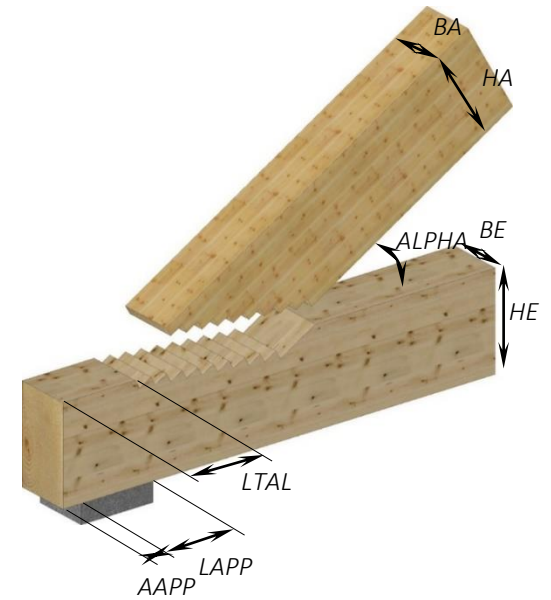
1.4 Conditions limites et chargement

Type axes neutre

- Option 3 : Appui axes neutres
 - * $VAR_APPUI = 3$
 - * Les conditions limites et le chargement sont les mêmes que pour l'option 2, la différence provient de l'emplacement de l'appui qui est calculé afin de correspondre à l'intersection des axes neutres de l'entrait et de l'arbalétrier.
 - * $X_{inter} = (HA/2./CA) - (HA/2./TA)$; (calcul de la coordonnée sur X du point d'intersection entre les axes neutres de l'entrait et de l'arbalétrier)
 - * $AAPP = LTAL + X_{inter} - (LAPP / 2.)$; (calcul du débord)



Xinter



Définitions des paramètres géométriques

1.4 Conditions limites et chargement

Détails du code pour les différentes options

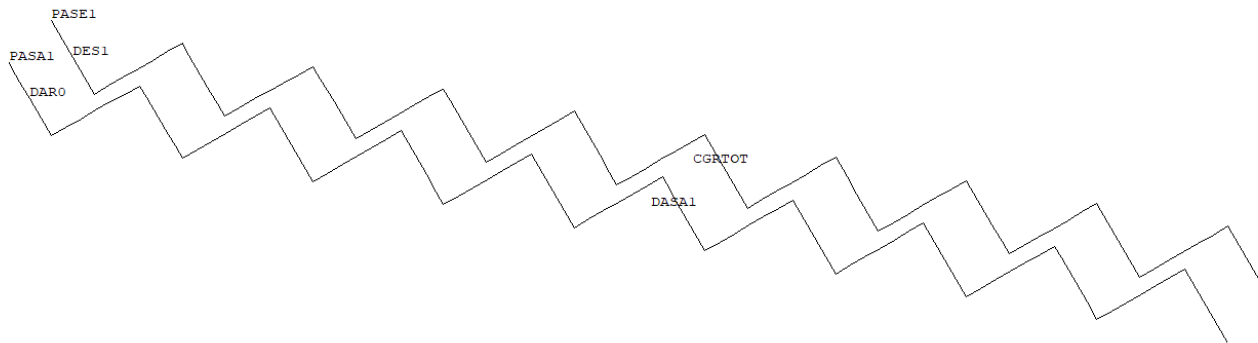
- Rappel sur la géométrie de l'appui
 - * LTAL Longueur du talon
 - * LAPP Longueur de l'appui
 - * AAPP Débord de l'appui
- Option 1 : essai poinçon ou pied arbalétrier **VAR_APPUI = 1**
TYPAPP = 1 ;
AAPP = 10. ; (définition d'un débord par défaut)
DAP0 = DEI4 ET DEI5 ET DEI6 ET DEI7 ; (droite de l'appui)
APY1 = BLOQ 'UX' 'UY' DAP0 ;
- Option 2 : Appui avec débord **VAR_APPUI = 2**
TYPAPP = 2 ; (contact sur plaque rotulée)
AAPP = 0. ; (débord de l'appui à définir)
- Option 3 : Appui axes neutres **VAR_APPUI = 3**
TYPAPP = 2 ; (contact sur plaque rotulée)
Xinter = (HA/2./CA) - (HA/2./TA) ; (calcul de la coordonnée sur X du point d'intersection entre les axes neutres de l'entrait de de l'arbalétrier)
AAPP = LTAL + Xinter - (LAPP / 2.) ; (calcul du débord)

```
DAP0 = DEI5 ET DEI6 ;  
DAP1 = DAP0 'PLUS' (0. 0.) ;  
DEPL DAP1 'PLUS' ((0.) (0.-JASS));  
RCAP = RELA MAXI 'UY' DAP1 - 'UY' DAP0 ;  
PEIINIT = DAP1 POIN 'INITIAL' ;  
PEIFINL = DAP1 POIN 'FINAL' ;  
XPAP2 = ((COOR 1 PEIINIT) + (COOR 1 PEIFINL)) / 2 ;  
YPAP2 = ((COOR 2 PEIINIT) + (COOR 2 PEIFINL)) / 2 ;  
PAP2 = DAP1 POIN 'PROC' (XPAP2 YPAP2);  
APY1 = BLOQ 'UX' 'UY' PAP2;
```

1.4 Conditions limites et chargement

Ajout du frottement entre l'entrait et l'arbalétrier

- Géométrie Arbalétrier :
 - Avec entaille arrière : DAR1
 - Sans entaille arrière : DAR0 ET DASA1
- Géométrie Entrait :
 - Avec entaille arrière : CGRENT (attention discontinuité car décalage, droite DEI11binf)
 - Sans entaille arrière : DES1 ET CGRTOT



- MODE et MAT
CFMU = 0.1 ;
MOGR = MODE (DES1 ET CGRTOT) 'CONTACT' 'FROTTANT' 'COULOMB' (DAR0 ET DASA1) ;
MAGR = MATE MOGR 'MU' CFMU ;

La valeur du frottement est estimée à 0.25 selon les essais de la tâche 3.4 du projet `hardhood_joint`.

Lors de l'ajout du frottement le temps de calcul augmente (environ douze fois plus long)

→ Ajout d'une option pour prendre en compte le frottement : si `VAR_FRT = 1` alors frottement sinon non

1.5 Calcul

Calcul non linéaire : utilisation de la procédure PASAPAS

Temps de fin dépend du déplacement

```
TPSFIN = ABS (DPL) * 10. ;
```

Liste des pas de calcul dépend du pas de calcul

```
PASTPS = 1. ;
```

```
LTPS = PROG 0. 'PAS' PASTPS TPSFIN ;
```

Création d'un procédure PERSO1 pour affichage lors des calculs

information sur le nombre de points en déformation cumulée en cisaillement

soit maillage de la déformée et des forces de réaction en NCLIK

soit contrainte de cisaillement le long du joint en NCLIK

ajout d'une tempo pour avoir le temps de voir les figures

1.6 Post-traitement : sorties

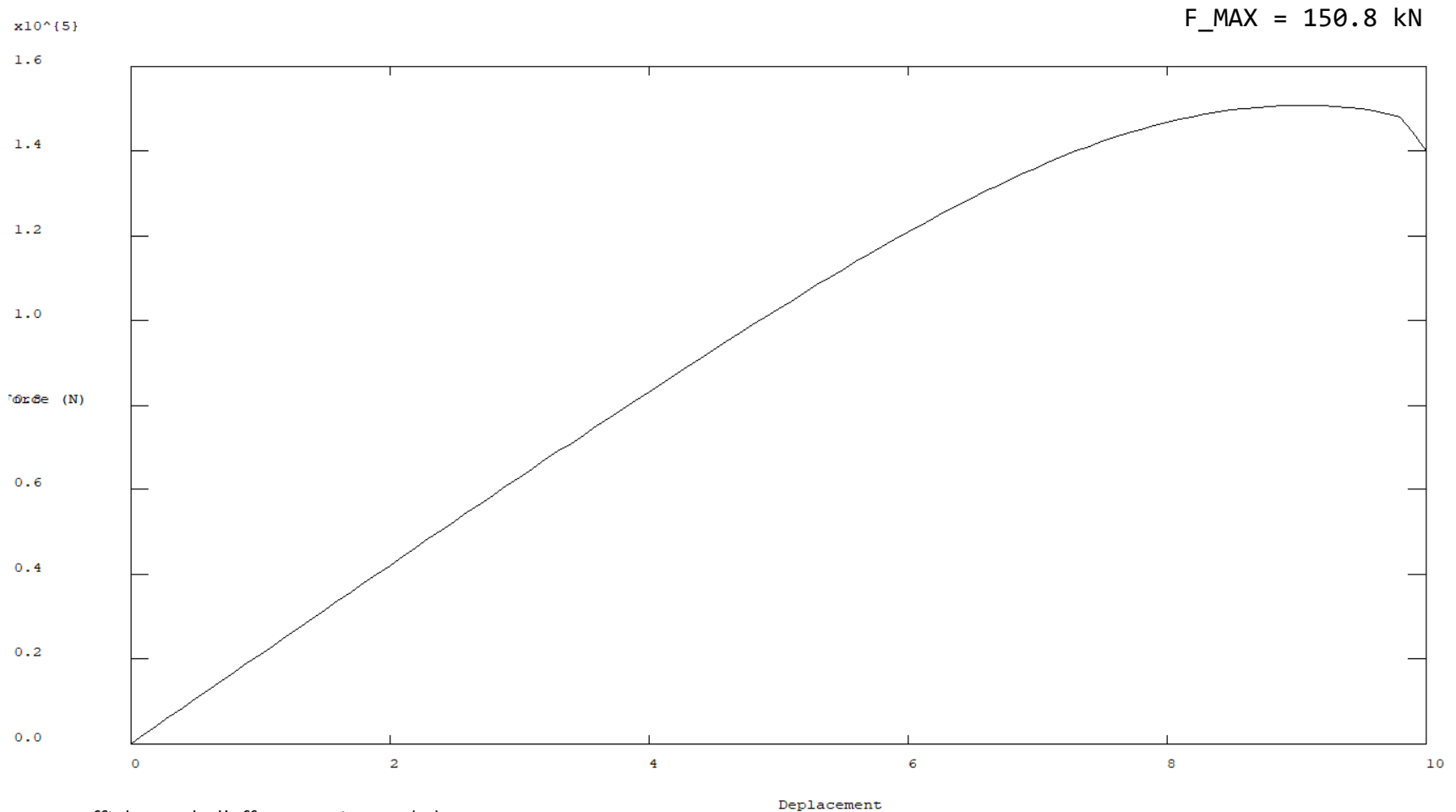
Le post-traitement des simulations numérique permet d'obtenir différentes valeurs qui seront utilisées pour l'analyse des essais et l'étude paramétrique :

- Force en fonction du déplacement au point de chargement
 - DESS
 - MESS Fmax
 - SAUV dans F_DPL.csv
- Force en fonction du déplacement cibles
 - DESS
 - SAUV dans F_DPL.csv → calcul des pentes
- Déformée
 - TRAC
- Déformée réelle animée
 - TRAC
- Champs de contraintes : axial, transversal et cisaillement au temps Fmax
 - DESS
 - SAUV en .psc
- Contraintes de cisaillement et transversale le long du joint
 - DESS au temps Fmax
 - SAUV dans SIG_CSJT.csv et SIG_YYJT.csv de tous les temps

1.6 Post-traitement : sorties

Force en fonction du déplacement au point de chargement

- Récupération des déplacements au point de chargement (mm)
 - Récupération de la force 'FY' (multipliée par -1) au point de chargement (N)
- Courbe : Force en fonction du déplacement au point de chargement



- Affichage de l'effort maximum (N)
F_MAX

1.6 Post-traitement : sorties

Force en fonction du déplacement - Cibles

Géométrie

- Attention au placement des cibles selon les essais
- Utilisation de POIN 'PROC' sur le maillage : placement au plus proche mais pas exacte

Déplacement 7 dans 8 en Y

- Force : $F = FY$
- $DPLC_8_Y - DPLC_7_Y$
- Raideur assemblage Y : $K_{ass,Y}$
- Cibles du centre et non moyenne de DPLC de toutes les cibles

Déplacement 7 dans 8 en X

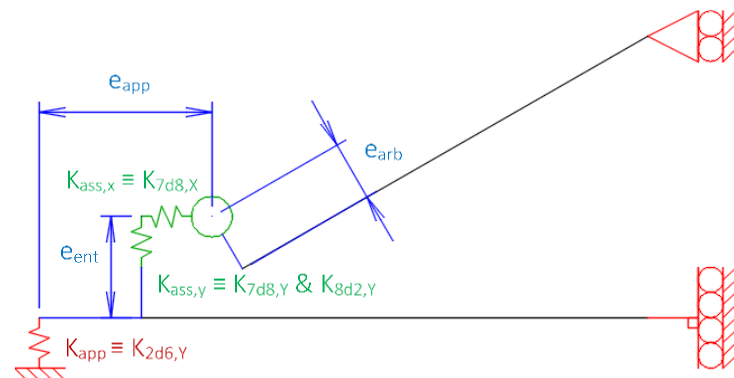
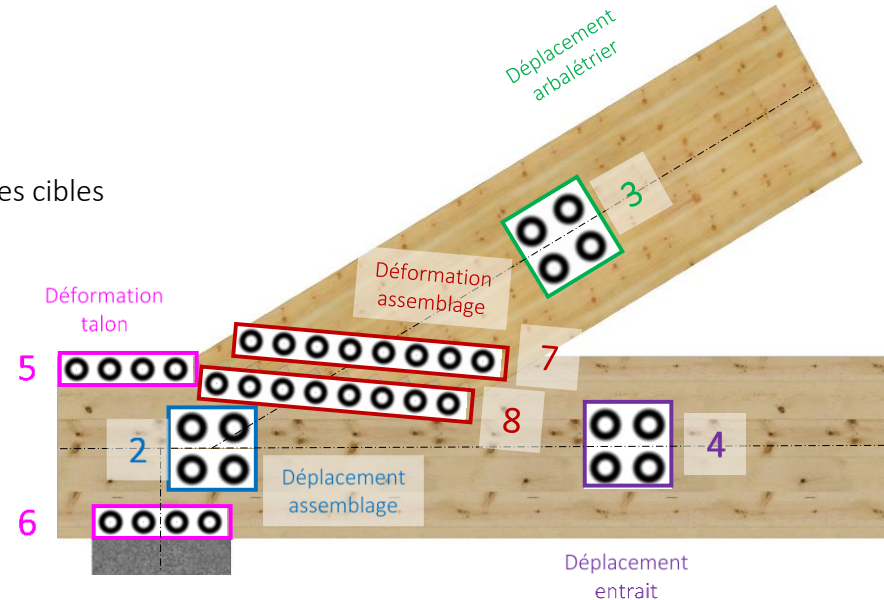
- Force : $F = FY / \tan(\text{ALPHA})$
- $DPLC_8_X - DPLC_7_X$
- Raideur assemblage X : $K_{ass,X}$

Déplacement 8 dans 2 en Y

- Force : $F = FY$
- $DPLC_2_Y - DPLC_8_Y$
- Une partie de la raideur d'assemblage Y : $K_{ass,Y}$

Déplacement 2 dans 6 en Y

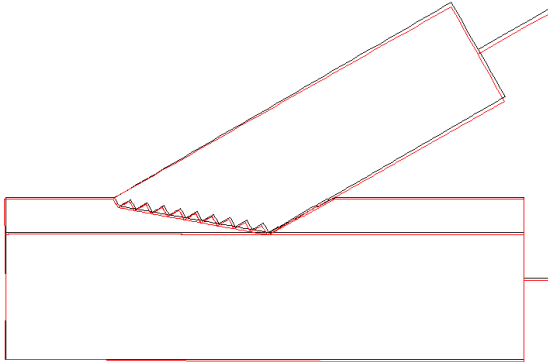
- Force : $F = FY$
- $DPLC_6_Y - DPLC_2_Y$
- Une partie de la raideur d'assemblage Y : $K_{ass,Y}$



1.6 Post-traitement : sorties

Déformée

- Figure déformée (dernier temps de calcul) avec maillage initiale

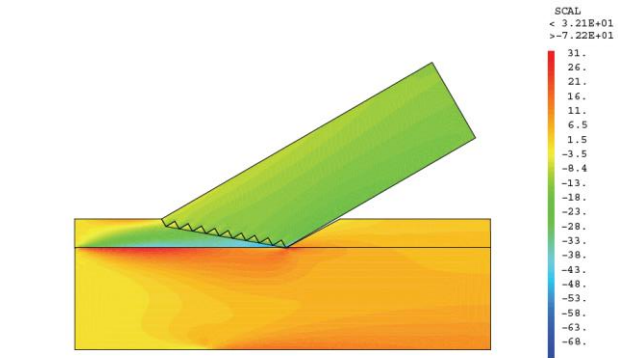
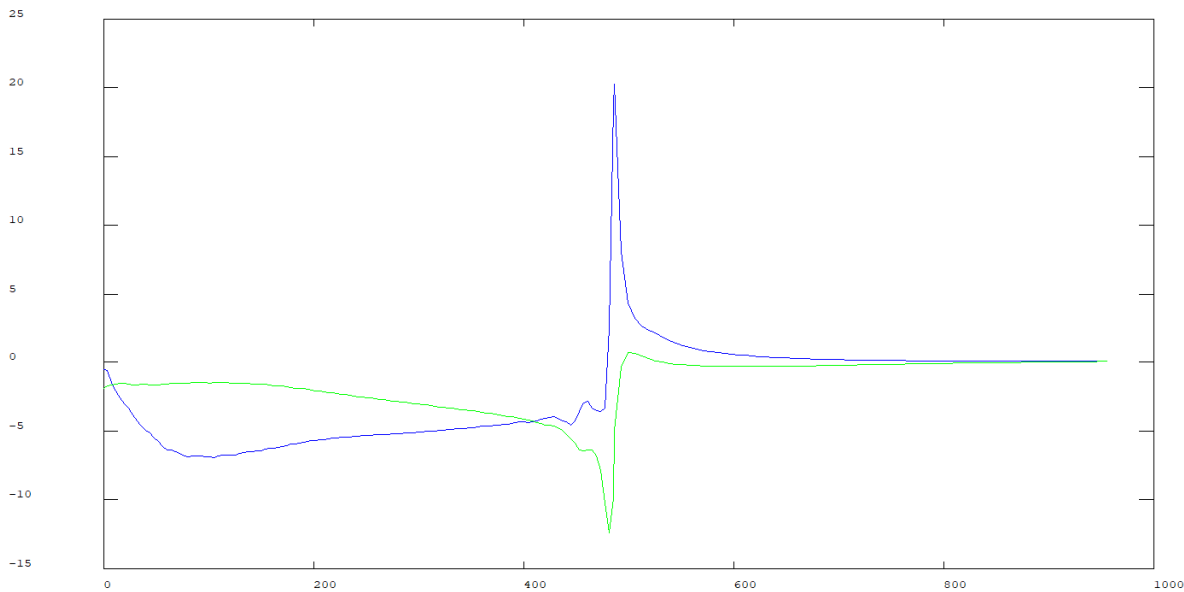


- Version animée (OSCIL) avec déformée réelle : récupération des déplacements pour chaque temps de calcul

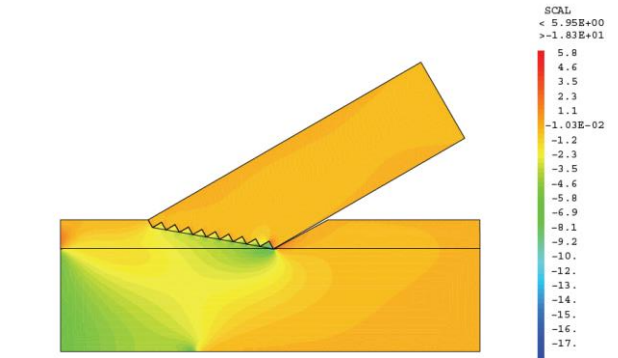
1.6 Post-traitement : sorties

Contraintes

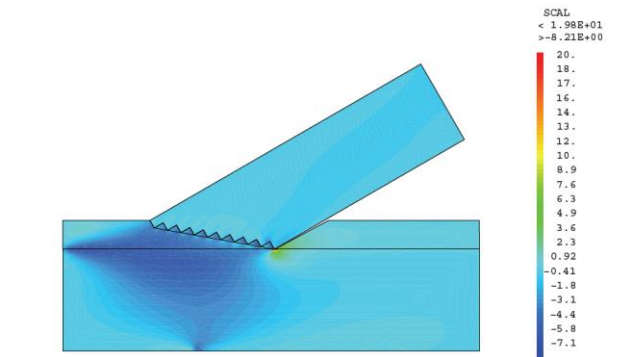
- Champs de contraintes surfaces (arbalétrier et entrain) : EPSI ELAS
- Champs de contraintes points surface (arbalétrier et entrain)
- Ajout champs entrain et arbalétrier :
 - 'SMXX' : axiale (MPa)
 - 'SMYY' : transversale (MPa)
 - 'SMXY' : cisaillement (MPa)
- Contrainte de cisaillement (MPa) le long du joint (mm) BLEU
- Contrainte transversale (MPa) le long du joint (mm) VERT



Contrainte axiale



Contrainte transversale



Contrainte de cisaillement

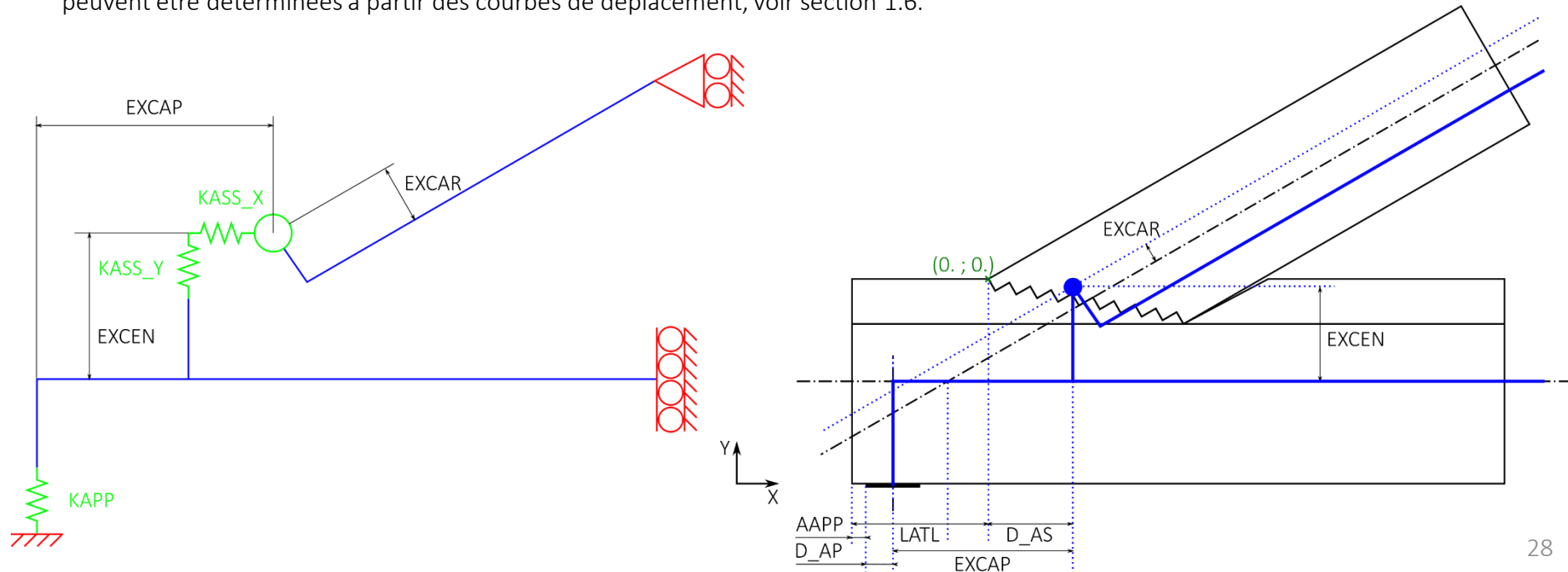
1.7 Calcul des excentricités

L'un des modes de rupture identifiés est la rupture en flexion de la section réduite de l'entrait, induite par l'excentricité entre l'assemblage et l'appui. Les efforts ne s'appliquant pas forcément à l'axe des pièces, il est nécessaire de calculer le moment résultant pour obtenir l'excentricité réelle entre l'appui et l'assemblage.

Les excentricités entre l'assemblage et l'entrait ou l'arbalétrier sont également calculées, pour obtenir la bonne répartition d'efforts avec un modèle barres. En effet, un modèle simplifié où toutes les barres sont concourantes échoue à prendre en compte les efforts dus aux excentricités.

Le modèle Cast3M permet d'obtenir les contraintes dans la zone d'assemblage. La force résultante à chaque nœud, correspondant à la réaction d'appui, est extraite du maillage surfacique au niveau de l'appui, de l'entrait et de l'arbalétrier. Le moment de chacune de ces forces est calculé en multipliant la force par la distance à l'axe de l'élément. La somme des moments à chaque nœud donne le moment résultant à l'appui, dans l'entrait et dans l'arbalétrier.

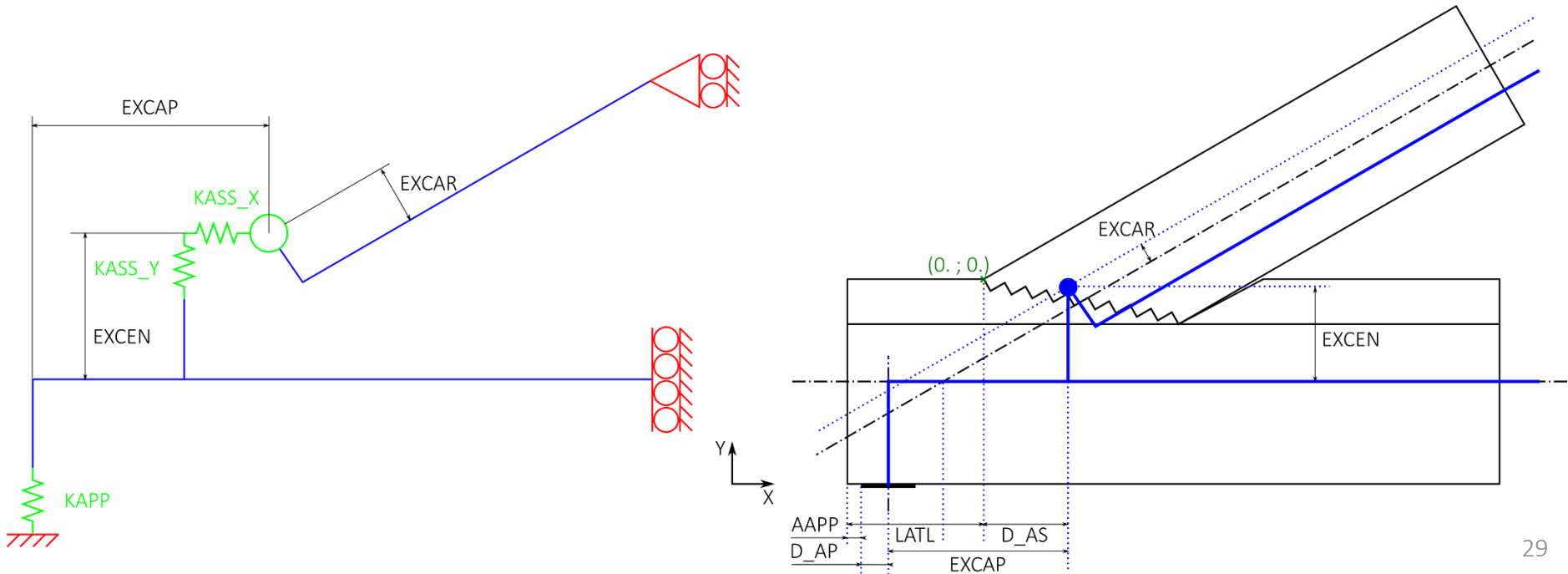
Les calculs des excentricités sont donnés dans la suite de cette section (EXCAP, EXCAR et EXCEN), les raideurs (KASS_Y et KASS_X) peuvent être déterminées à partir des courbes de déplacement, voir section 1.6.



1.7 Calcul des excentricités

Excentricité de la charge sur l'arbalétrier

- Excentricité de la charge sur l'arbalétrier : $e_{arb} = EXCAR$
 $EXCAR = MAR / NAR$;
- Décalage appui / assemblage : $e_{app} = EXCAP$
 $EXCAP = LTAL - AAPP - D_{AP} + D_{AS}$;
 - Position de la résultante sur l'Appui
 $D_{AP} = NAP / MAP$;
 - Position résultante entailles Entrait
 $D_{AS} = NENGR / MENGR$;
- Excentricité de la charge sur l'entrait : $e_{ent} = EXCEN$
 $EXCEN1 = (EXCAP * NAP - MEN) / NEN$;



1.7 Calcul des excentricités

Excentricité de la charge sur l'arbalétrier

- Champ de contraintes, Effort Normal & Moment dans l'Arbalétrier de la Ferme

```
CCTFA = SIGMA CHDPL1 MOFA MAFA ;
```

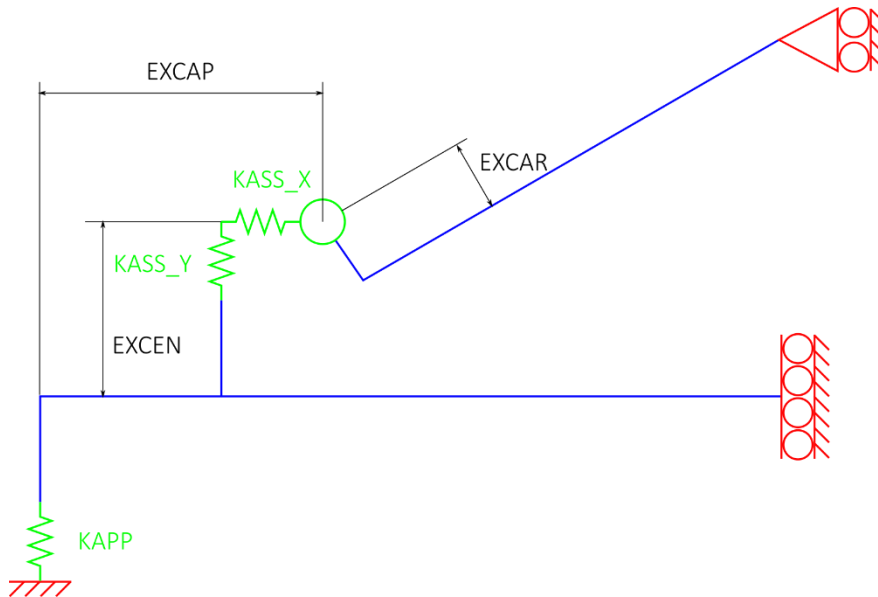
```
CCPFA = CHAN 'CHPO' CCTFA MOFA ;
```

```
NAR = EXTR CCPFA 'EFFX' (DFAR POIN 'PROC' PAR4) ;
```

```
MAR = EXTR CCPFA 'MOMZ' (DFAR POIN 'PROC' PAR4) ;
```

- Excentricité de la charge sur l'arbalétrier (mm)

```
EXCAR = MAR / NAR ;
```



1.7 Calcul des excentricités

Décalage de l'appui

- Calcul de la somme des moments aux nœuds de la droite de l'appui (DEI56)

```
CHPXDEI56 = COOR 1 DEI56 ;  
CHPXDEI56 = KOPS CHPXDEI56 '-' (AAPP - LTAL) ;  
CHPFYDEI56 = EXCO CFRDEI56 'FY' ;  
CHPMAP = CHPXDEI56 * CHPFYDEI56 ;  
MAP = RESU CHPMAP ;  
MAP = EXTR MAP 'VALE' ;  
MAP = EXTR MAP 1 ;
```

- Champ de Forces Réduites de la Droite de l'appui DEI56

```
CFRDEI56 = REDU CFNEN DEI56 ;  
FRSDEI56 = RESU CFRDEI56 ;  
FXDEI56 = EXTR FRSDEI56 'VALE' 'FX' ;  
FYDEI56 = EXTR FRSDEI56 'VALE' 'FY' ;  
FXDEI56 = EXTR FXDEI56 1 ;  
FYDEI56 = EXTR FYDEI56 1 ;
```

- Effort normal droite appui

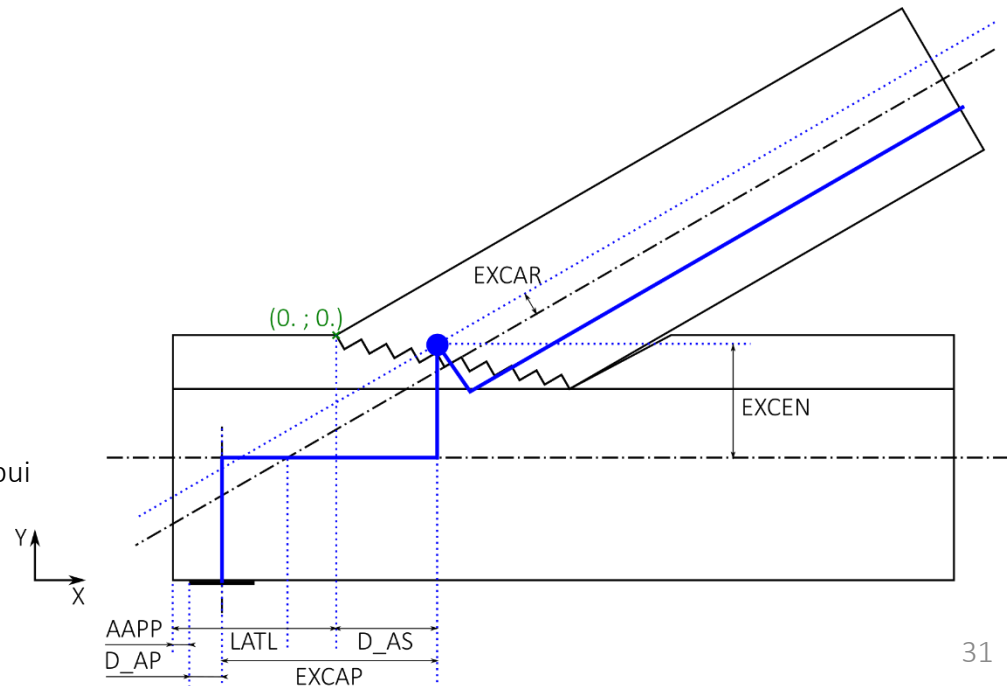
```
NAP = FYDEI56 ;
```

- Position de la résultante sur l'Appui

```
D_AP = NAP / MAP ;
```

Remarque : appui sur rotule donc résultante au milieu de l'appui

```
D_AP = LAPP / 2. ;
```



1.7 Calcul des excentricités

Décalage de l'appui

- Calcul de la somme des moments aux nœuds de la droite de l'appui (DEI56)

```
CHPXCGRNT = COOR 1 CGRENT ;  
CHPFYCGRENT = EXCO CFRCGRENT 'FY' ;  
CHPMENGR = CHPXCGRNT * CHPFYCGRENT ;  
MENGR = RESU CHPMENGR ;  
MENGR = EXTR MENGR 'VALE' ;  
MENGR = EXTR MENGR 1 ;
```

- Champ de Forces Réduites des Droites entaillées Entrait CGRENT

```
CFRCGRENT = REDU CFNEN CGRENT ;  
FRSCGRENT = RESU CFRCGRENT ;  
FXCGRENT = EXTR FRSCGRENT 'VALE' 'FX' ;  
FYCGRENT = EXTR FRSCGRENT 'VALE' 'FY' ;  
FXCGRENT = EXTR FXCGRENT 1 ;  
FYCGRENT = EXTR FYCGRENT 1 ;
```

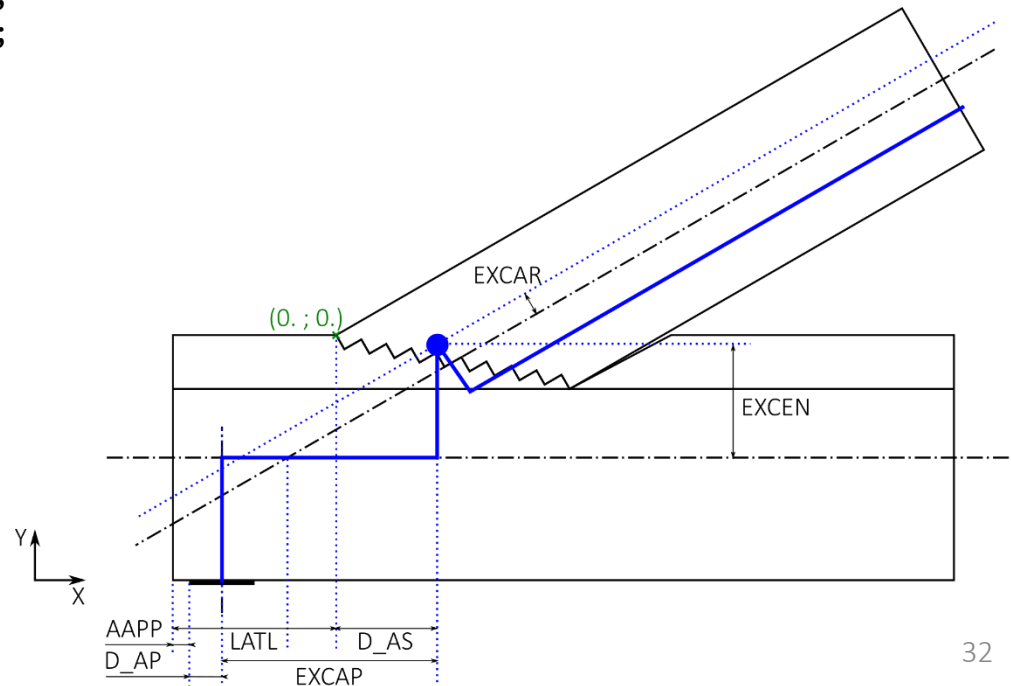
- Effort normal droite appui
 $NENGR = FYCGRENT ;$

- Position résultante entaillées Entrait

$$D_AS = NENGR / MENGR ;$$

- Décalage appui / assemblage

$$EXCAP = LTAL - APP - D_AP + D_AS ;$$

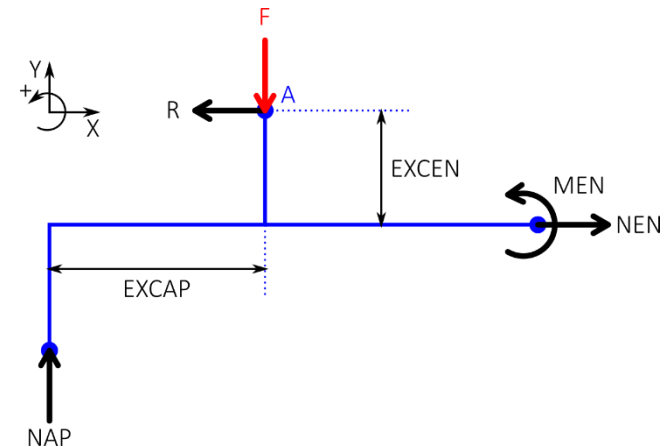
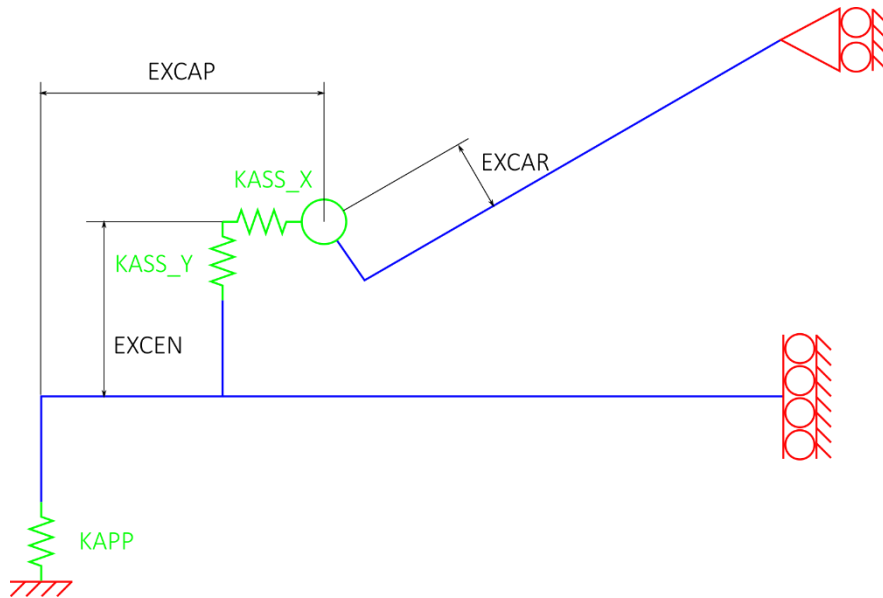


1.7 Calcul des excentricités

Excentricité de la charge sur l'entrait

- Champ de contraintes, Effort Normal & Moment dans l'Entrait de la Ferme
 $CCTFE = SIGMA\ CHDPL1\ MOFE\ MAFE ;$
 $CCPFE = CHAN\ 'CHPO'\ CCTFE\ MOFE ;$

 $NEN = EXTR\ CCPFE\ 'EFFX'\ (DFEN\ POIN\ 'PROC'\ PEI9) ;$
 $MEN = EXTR\ CCPFE\ 'MOMZ'\ (DFEN\ POIN\ 'PROC'\ PEI9) ;$
- Excentricité de la charge sur l'entrait
 $EXCEN = (EXCAP * NAP - MEN) / NEN ;$



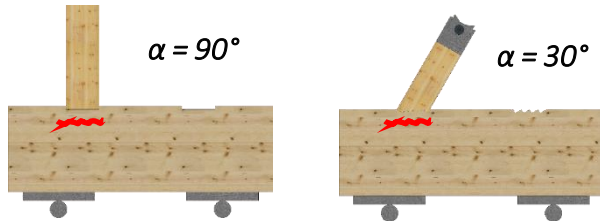
$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \Leftrightarrow NEN - R = 0 \\ \sum F_y = 0 \Leftrightarrow NAP - F = 0 \\ \sum M_z^A = 0 \Leftrightarrow -NAP \times EXCAP + NEN \times EXCEN + MEN = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} NEN = R \\ NAP = F \\ EXCEN = \frac{NAP \times EXCAP - MEN}{NEN} \end{cases}$$

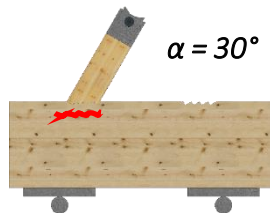
2 Modélisation des essais

2.1 Présentation des essais

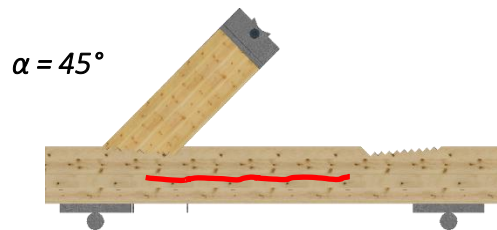
Les essais ont été effectués sur du lamellé collé d'épicéa pour 4 configurations définies selon l'angle entre l'arbalétrier et l'entrait, soit $\alpha = 30^\circ$, 45° , 60° et 90° . Ces différentes configurations permettent d'étudier le mode de rupture, la résistance et la raideur de l'assemblage. La configuration à 90° sert à vérifier l'influence des effets de bord.



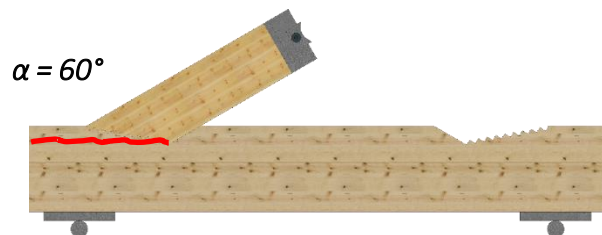
Compression transversale ($k_{c,90}$)



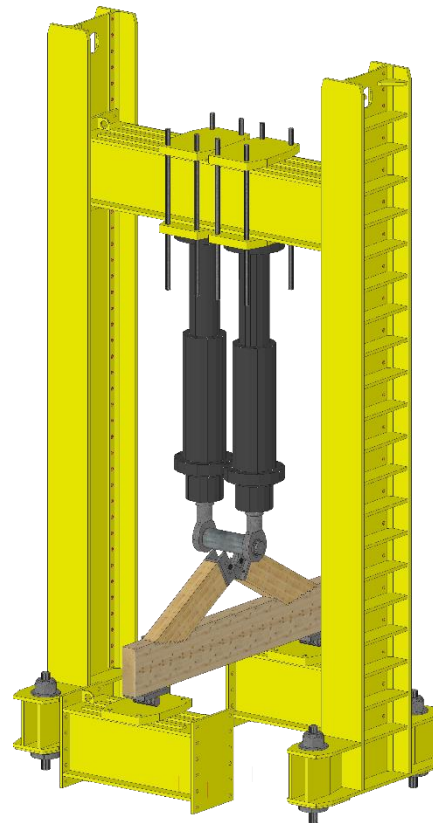
Compression sous l'assemblage ($f_{c,\alpha,k}$)



Cisaillement de la section réduite de l'entrait (l_{ecc})



Cisaillement des talons ($l_{v,eff}$ & $k_{v,red}$)



Banc d'essais

Banc d'essais

Les essais sont effectués sur une ferme comprenant deux embrèvements.

La ferme repose sur des appuis simples, pouvant se déplacer latéralement.

Deux vérins sont jumelés pour obtenir l'effort à rupture, leur capacité nominale est de 800 kN.

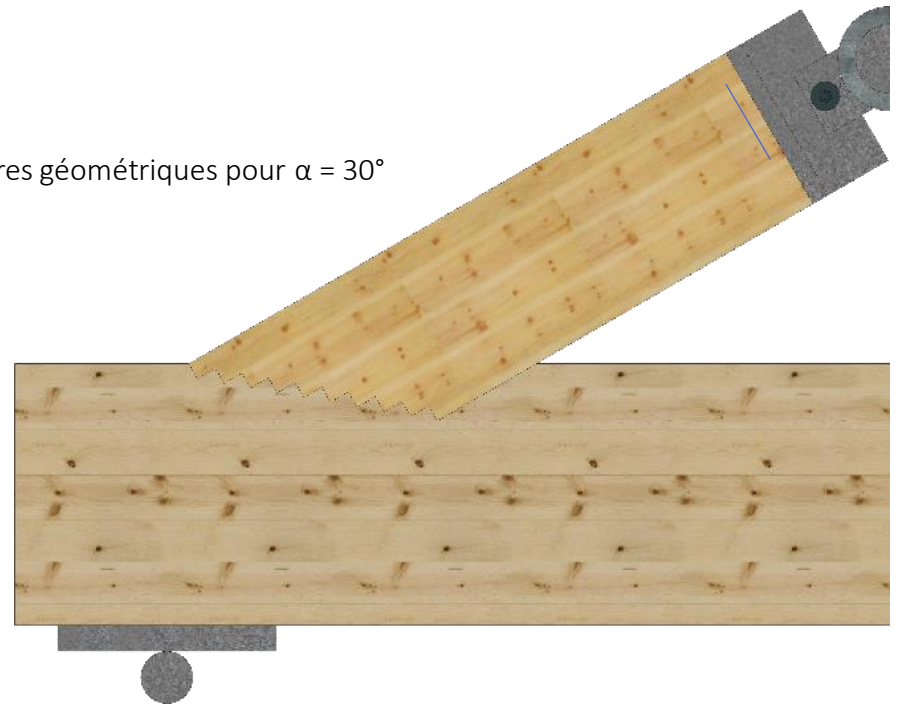
Un axe cylindrique relie les deux vérins et s'appuie sur deux ferrures permettant la rotation en tête d'arbalétrier



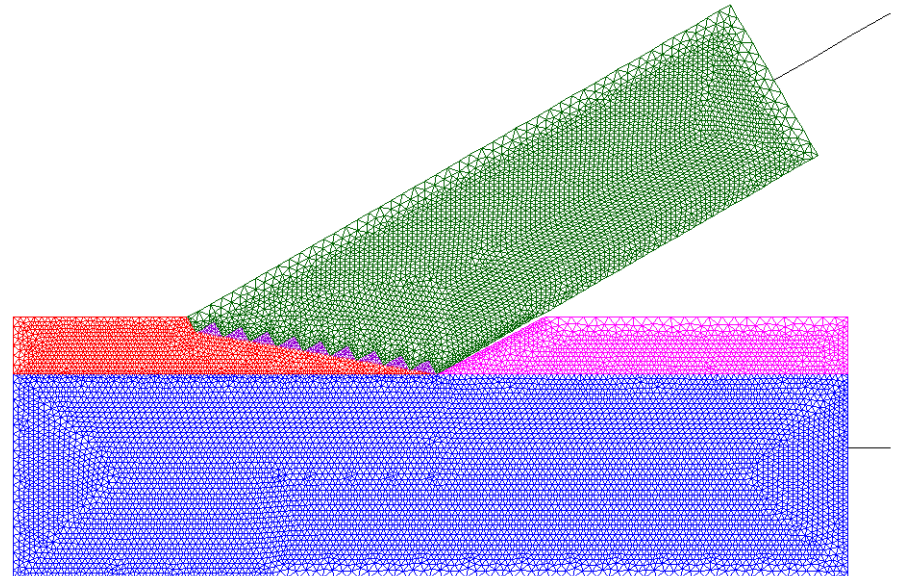
2.1 Présentation des essais

Le tableau ci-dessous donne les valeurs des différents paramètres géométriques pour $\alpha = 30^\circ$

Définition	Cast3M	ALPHA = 30°
Angle de l'arbalétrier	ALPHA	30
Hauteur faitage	-	650
Demi-portée de la ferme	DPOR	606.22
Hauteur de l'entrait	HE	300
Hauteur de l'arbalétrier	HA	200
Base de l'entrait	BE	100
Base de l'arbalétrier	BA	100
Longueur du talon	LTAL	200
Débord de l'appui	AAPP	0
Longueur de l'appui	LAPP	100
Nombre d'entailles	NGR	10
Angle de progression des entailles	BETA	10



Représentation CAO de l'assemblage pour $\alpha = 30^\circ$



Maillage de l'assemblage pour $\alpha = 30^\circ$

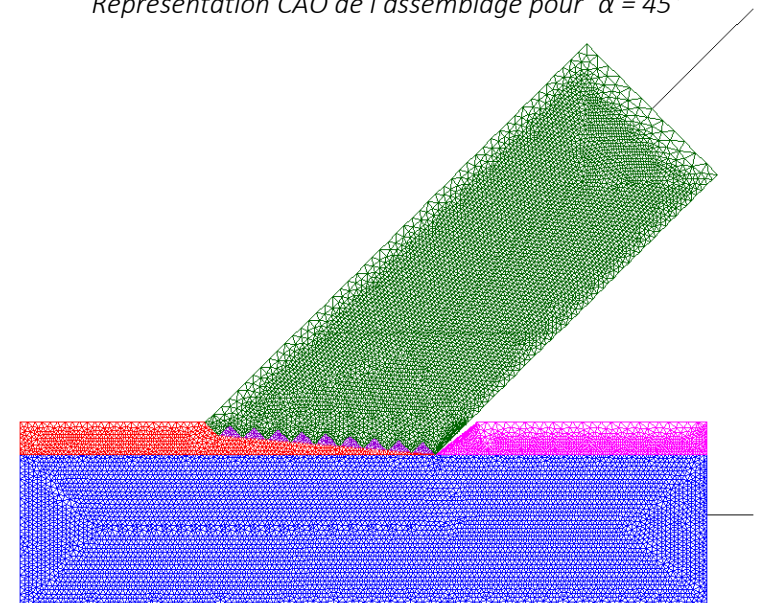
2.1 Présentation des essais

Le tableau ci-dessous donne les valeurs des différents paramètres géométriques pour $\alpha = 45^\circ$

Définition	Cast3M	ALPHA = 45°
Angle de l'arbalétrier	ALPHA	45
Hauteur faitage	-	650
Demi-portée de la ferme	DPOR	450
Hauteur de l'entrait	HE	200
Hauteur de l'arbalétrier	HA	200
Base de l'entrait	BE	100
Base de l'arbalétrier	BA	100
Longueur du talon	LTAL	200
Débord de l'appui	AAPP	0
Longueur de l'appui	LAPP	100
Nombre d'entailles	NGR	10
Angle de progression des entailles	BETA	5



Représentation CAO de l'assemblage pour $\alpha = 45^\circ$



Maillage de l'assemblage pour $\alpha = 45^\circ$

2.1 Présentation des essais

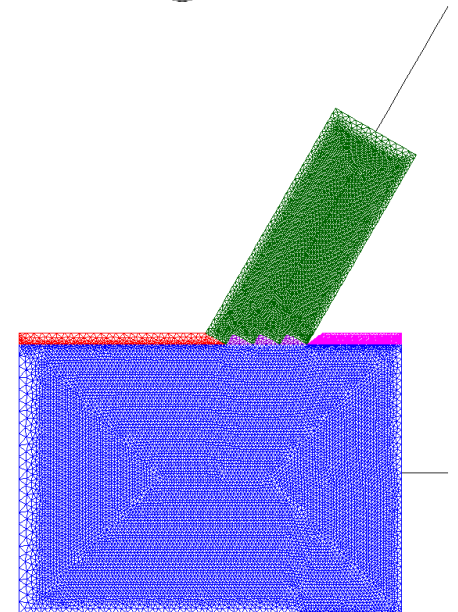
Le tableau ci-dessous donne les valeurs des différents paramètres géométriques pour $\alpha = 60^\circ$

Définition	Cast3M	ALPHA = 60°
Angle de l'arbalétrier	ALPHA	60
Hauteur faitage	-	650
Demi-portée de la ferme	DPOR	202.07
Hauteur de l'entrait	HE	300
Hauteur de l'arbalétrier	HA	100
Base de l'entrait	BE	100
Base de l'arbalétrier	BA	100
Longueur du talon	LTAL	200
Débord de l'appui	AAPP	0
Longueur de l'appui	LAPP	100
Nombre d'entailles	NGR	4
Angle de progression des entailles	BETA	0

*Représentation CAO
de l'assemblage pour
 $\alpha = 60^\circ$*



*Maillage de
l'assemblage
pour $\alpha = 60^\circ$*



2.1 Présentation des essais

Cycle de chargement

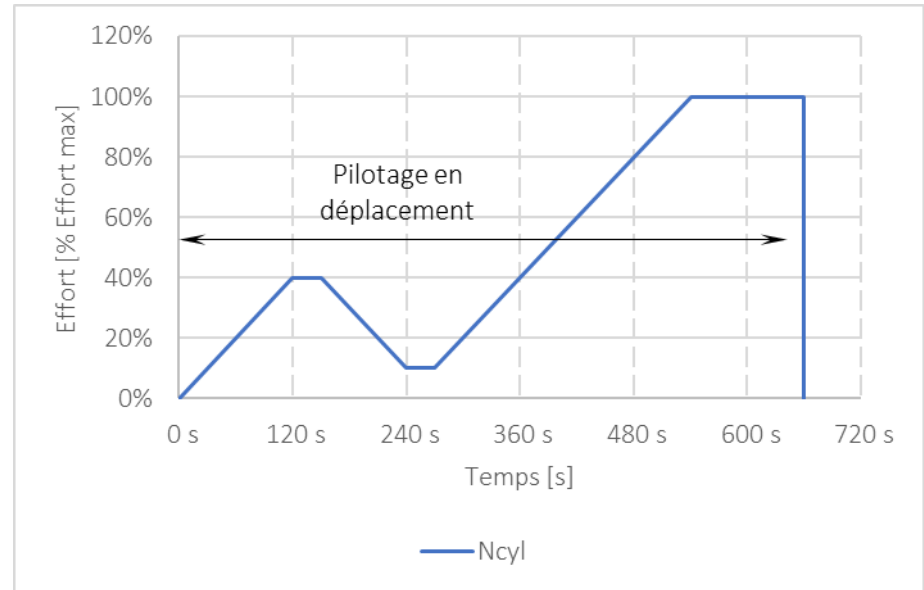
Le cycle de chargement est adapté de la norme NF EN 26891. Le cycle est composé d'un seuil d'effort et d'une montée à rupture. Le seuil est atteint par une montée en charge à 40 % de l'effort estimé à rupture et est maintenu 30 s. La charge est ramenée à 10 % de l'effort à rupture et maintenue 30 s. Ce seuil vise à déterminer une valeur de raideur d'utilisation, différente de la raideur initiale.

Le cycle se termine par une montée en charge jusqu'à rupture de l'un des embrèvements de la ferme.

L'essai est piloté par une montée en déplacement constante jusqu'au seuils de force. Le pilotage en déplacement est nécessaire pour synchroniser le déplacement des deux vérins et permet d'enregistrer la cinématique d'une rupture plastique à effort constant.

La vitesse de déplacement est de 1 mm/min, en estimant un déplacement vertical à rupture de 5 mm.

La durée totale d'essai est de 600 s ± 120



Alpha (angle arbalétrier) [°]	30	45	60	90
	Cisaillement des talons	Cisaillement de la SR de l'entrait	Compression sous l'assemblage	Compression transversale de l'entrait
Mode de rupture théorique				
Référence	ÉPI - 30 - n	ÉPI - 45 - n	ÉPI - 60 - n	ÉPI - 90 - n
Effort théorique				
Calcul en valeur moyenne [%]	50%	50%	50%	50%
Effort dans l'arbalétrier [kN]	48,20	51,62	40,32	35,94
Nombre d'assemblages [s.u.]	2	2	2	2
Effort vertical des vérins [kN]	48,20	73,00	69,84	71,88
Conditions d'essai				
Effort de pilotage total [kN]	50	80	70	80
Plateau 10% [kN]	5	8	7	8
Plateau 40% [kN]	20	32	28	32
Vitesse de déplacement des vérins [mm/min]	1	1	1	1

2.1 Présentation des essais

Dispositif de mesure - Essais

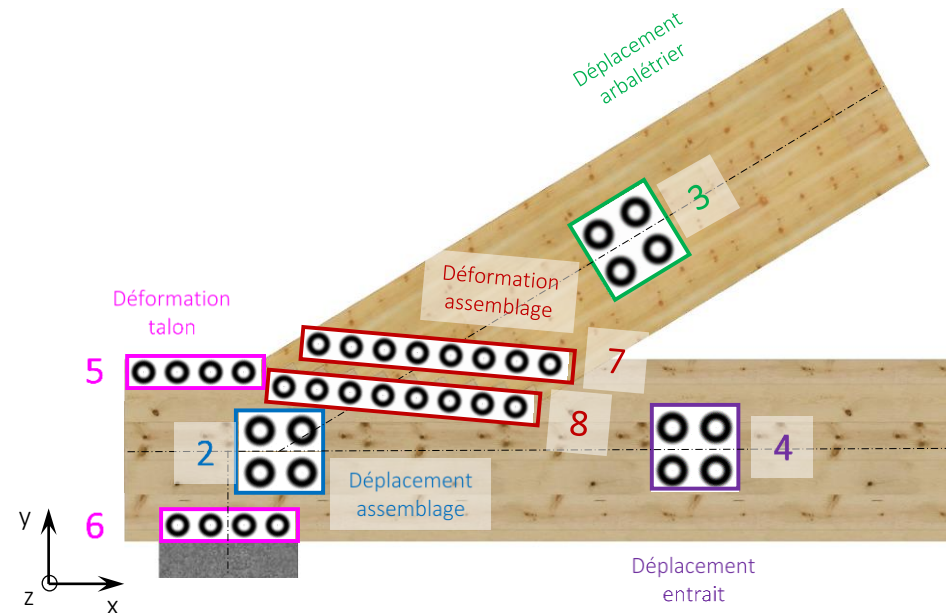
Tout au long de l'essai, l'effort appliqué sur la ferme et le déplacement des différentes pièces est mesuré en fonction du temps. Deux dispositifs sont utilisés :

La mesure de l'effort est effectuée par deux cellules de force d'une capacité de 450 kN et d'une précision de 1 %, fixées à l'extrémité de chacun des vérins. Ces cellules enregistrent également le déplacement des vérins.

Le déplacement dans l'assemblage est mesuré par acquisition vidéo de la position de cibles placées sur les points caractéristiques de l'éprouvette. Le déplacement des deux embrèvements de l'éprouvette est mesuré, ce qui permet d'obtenir les raideurs d'assemblage des deux côtés. Chaque ensemble de cibles devant être rigide pour éviter des déplacements parasites liés aux déformations des pièces, les cibles sont collées sur un contreplaqué qui est ensuite vissé sur l'axe neutre des pièces. La position absolue des cibles est relevée pour comparaison avec le modèle par éléments finis.

Les données suivantes sont présentées sur la figure

- Déplacement de l'assemblage (U_{2x} , U_{2y} , R_{2z} G & D)
- Déplacement de l'arbalétrier (U_{3x} , U_{3y} , R_{3z} G & D)
- Déplacement de l'entrait (U_{4x} , U_{4y} , R_{4z} G & D)
- Déformation de l'assemblage (U_{5x} , U_{5y} , R_{5z} G & D)
- Déplacement de l'appui (U_{6x} , R_{6z} G & D)



2.1 Présentation des essais

Dispositif de mesure – Cast3M

Exemple du maillage des cibles dans le cas des essais à 30°

Données cibles

- Largeur et hauteur des cibles = 50.

Objet 2

- Une cible au milieu : PCI2

Objet 6

- Une cible à l'axe de l'appui : PCI6
- Attention décalage avec essais

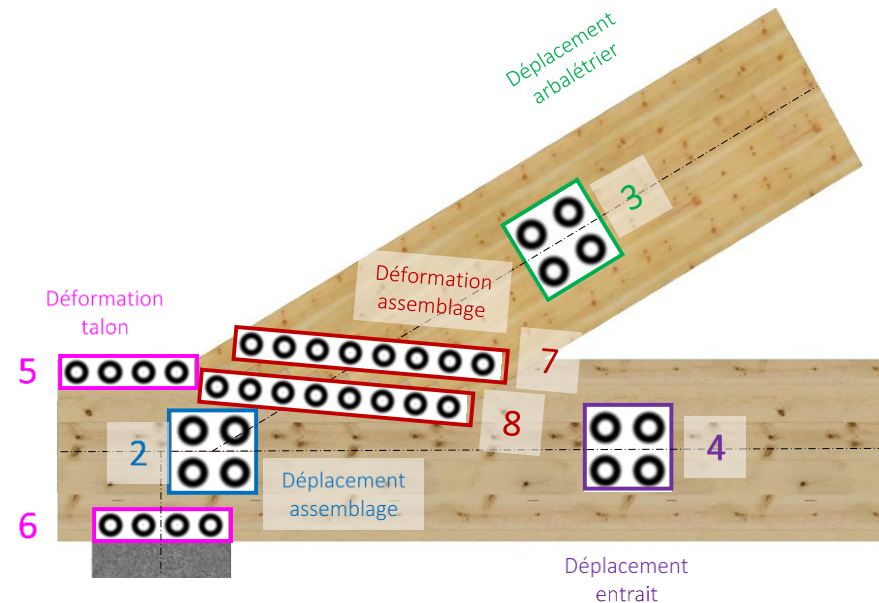
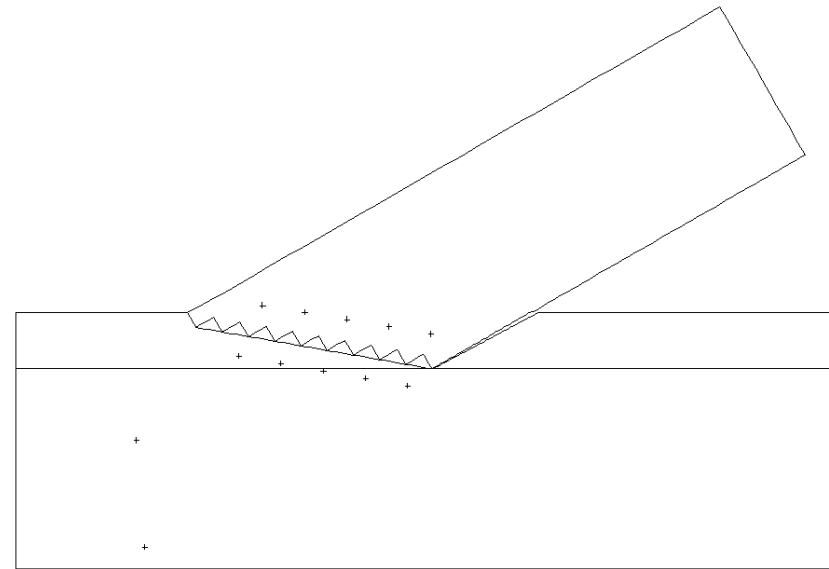
Objet 7

- 5 cibles : de PCI71 à PCI75
- Cible du milieu : PCI73

Objet 8

- 5 cibles : de PCI81 à PCI85
- Cible du milieu : PCI83

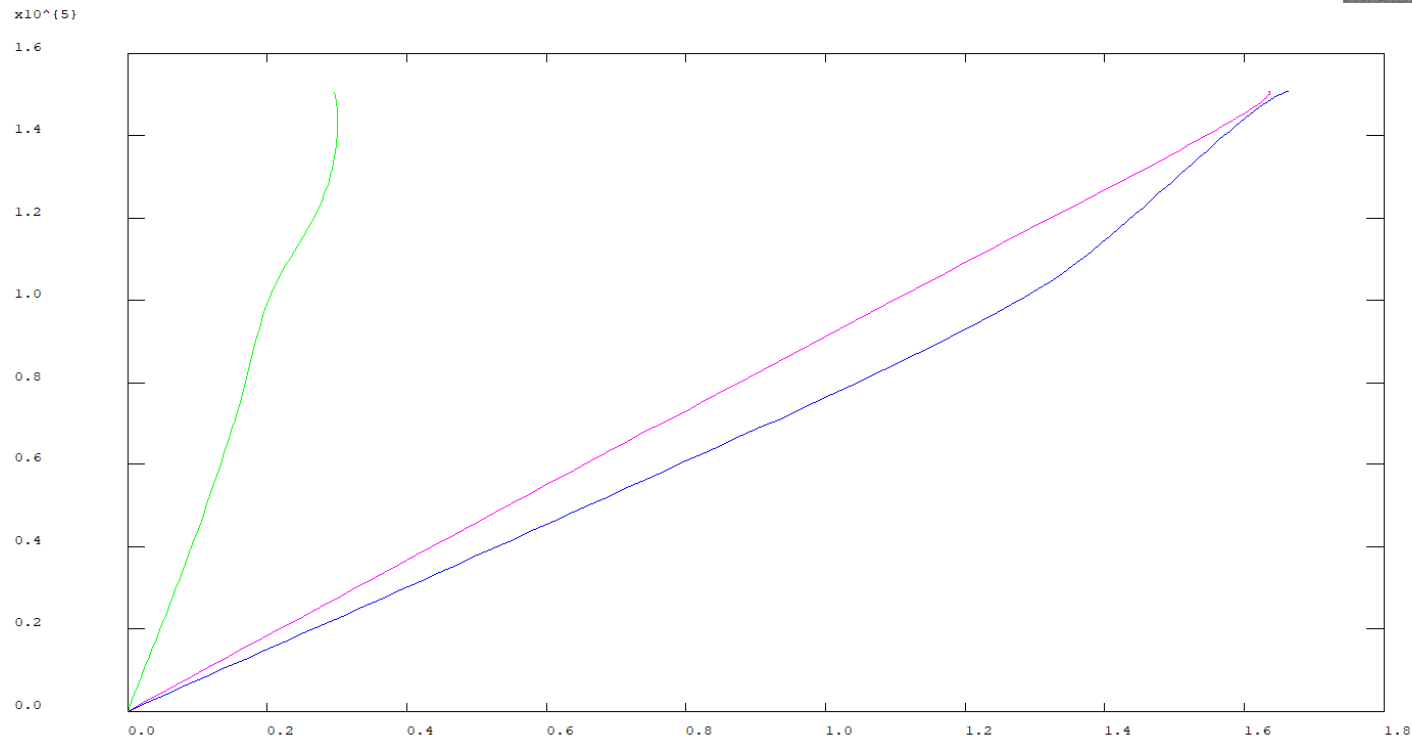
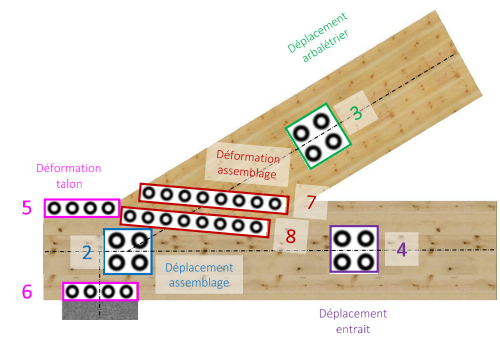
Remarque : la figure du dessus représente le placement des cibles pour les essais des résineux à 30°. Dans les autres cas objet 7 et objet 8 sont des points pris sur l'axe de l'arbalétrier et parallèle aux entailles distancés de la moitié de la hauteur d'une cible.



2.1 Présentation des essais

Dispositif de mesure – Cast3M

Effort en Y (N) en fonction du déplacement (mm) : 7d8 (VERT), 2d6 (ROSE) et 8d2 (BLEU)



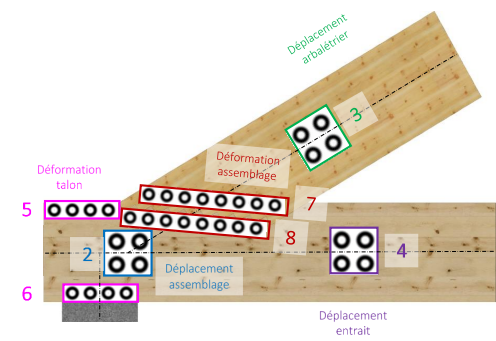
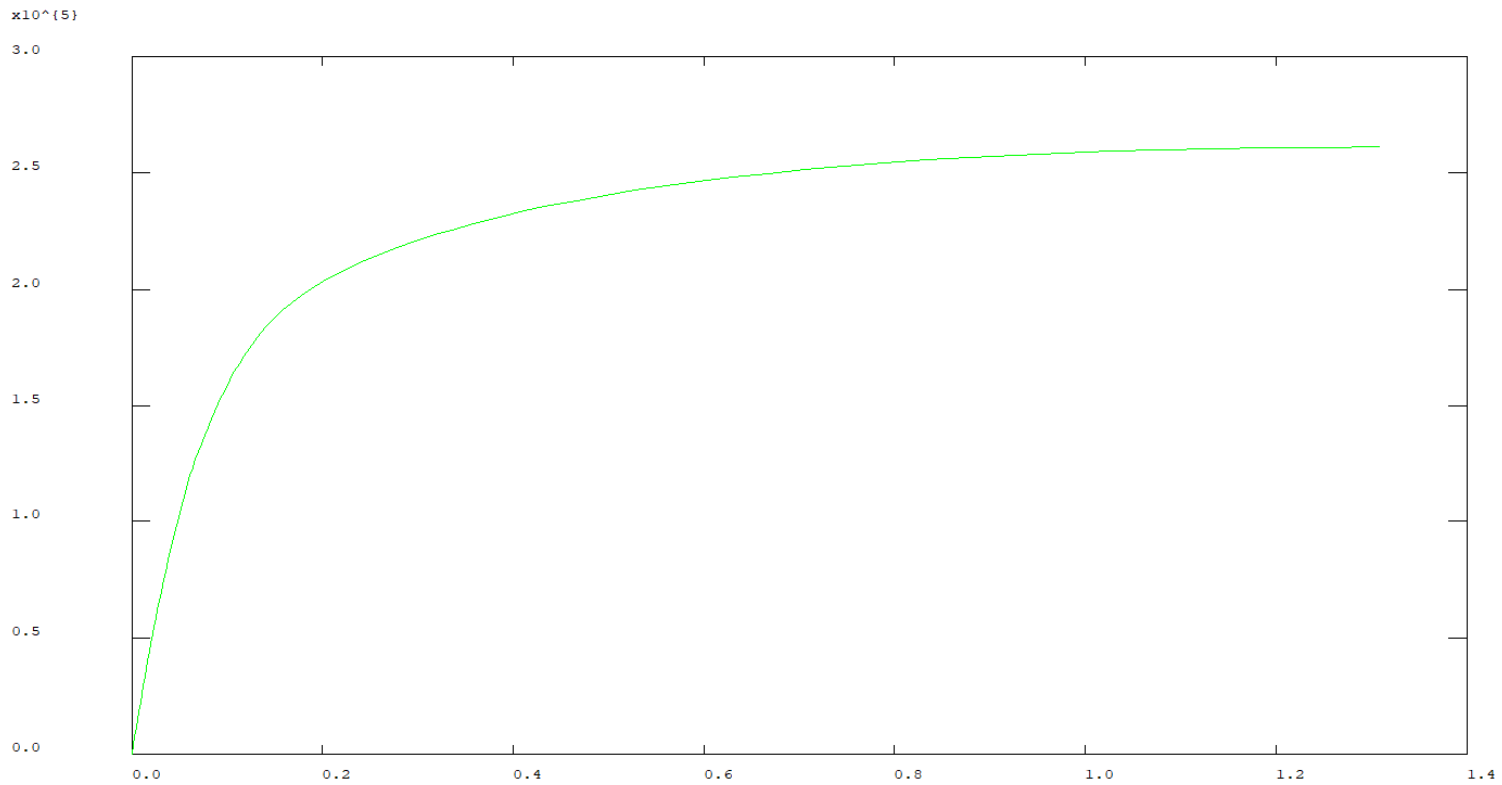
Comparaison entre les raideurs des essais pour $\alpha = 30^\circ$ et les raideurs des simulation numérique.

30°	K7d8,X	K7d8,Y	K8d2,Y	K2d6,Y
essais	809	268	103	65
Cast3M	1863	472	76	92

2.1 Présentation des essais

Dispositif de mesure – Cast3M

Effort en X (N) en fonction du déplacement (mm) : 7d8 (VERT)



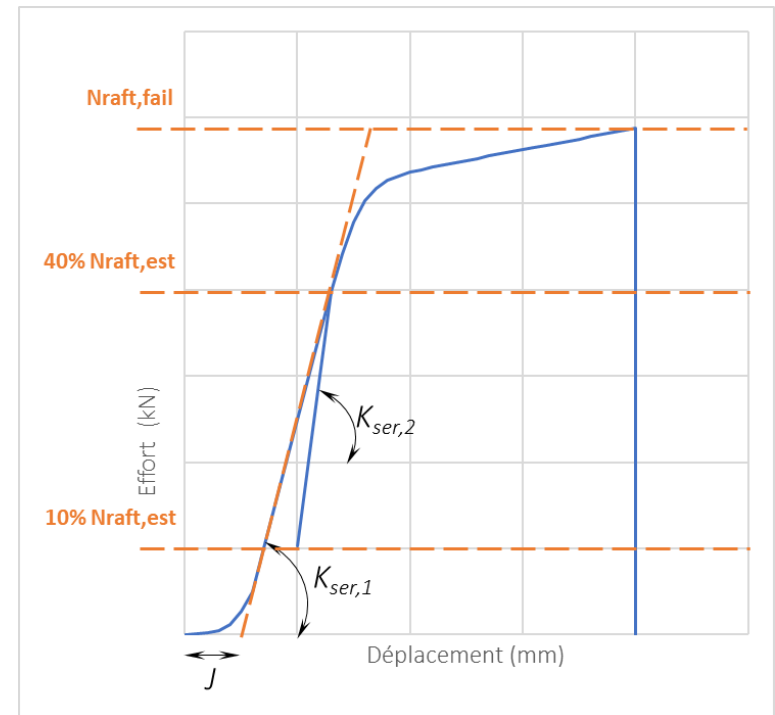
2.1 Présentation des essais

Caractérisation des assemblages

Pour chaque essai d'embrèvement sont présentés les données géométriques, les résultats expérimentaux, les images de rupture ainsi que les courbes efforts/déplacements.

Les données suivantes sont présentées :

- Effort vertical maximal des vérins ($N_{cyl, fail} = N_{cyl, max}$)
- Effort axial dans les arbalétriers à rupture ($N_{raft, fail} = N_{fail} / (2 * \sin(\alpha))$)
- Mode de rupture théorique
- Mode de rupture expérimental
- Position de l'assemblage rompu (Gauche ou Droite)
- Déplacement à rupture (u_{fail})
- Courbes effort/déplacement entre l'effort axial dans l'arbalétrier (N_{raft}) en fonction du déplacement de l'assemblage (u_{joint}).
- Jeux d'assemblage (J_g, J_d) entre les objets 7 et 8 (obtenus par l'abscisse à l'origine de la droite de régression linéaire entre les valeurs de 10 % et 40 % de l'effort estimé lors de la première montée en charge)
- Angle d'assemblage (α_{joint}) entre l'entrait et l'arbalétrier. Cet angle caractérise une rotation entre les pièces due aux moments parasites. Le risque de déchaussement (sans rupture des pièces) sera ainsi évalué.
- Raideurs d'assemblage ($K_{ser1, g}, K_{ser1, d}$) obtenues par régression linéaire entre les valeurs de 10 % et 40 % de l'effort estimé lors de la première montée en charge



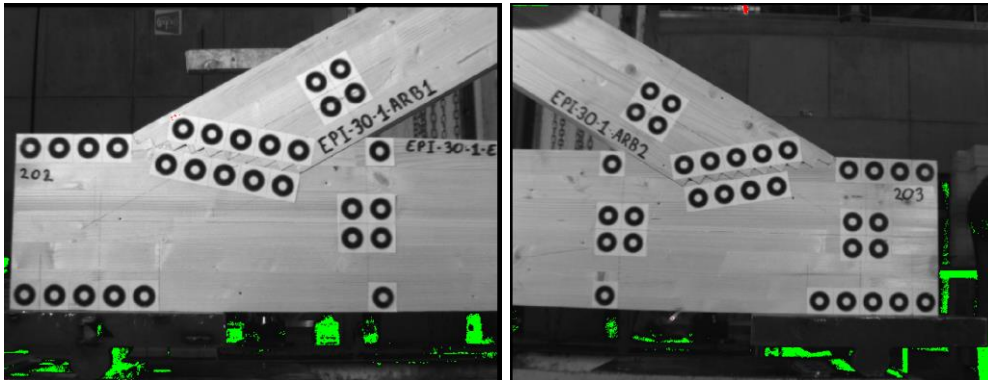
2.2 Essais $\alpha = 30^\circ$



Fichiers caméra :

EPI60-1003L1.8cap du 01/06/2021 à 9:11 : EPI-30-1-ARB1 – 202

EPI60-1003L2.8cap du 01/06/2021 à 9:11 : EPI-30-1-ARB2 – 203



Résultats MV fichier : 60_Dépouillement synthèse 30 v2.xlsm

Définition	Cast3M	EPI-30-1
Débord de l'appui	AAPP	0
Longueur de l'appui	LAPP	300
Hauteur cibles	LCIBL	50
Hauteur cibles objets 7 et 8	LCIBL2	50



Rupture fragile au cisaillement des talons de l'embrèvement

2.2 Essais $\alpha = 30^\circ$

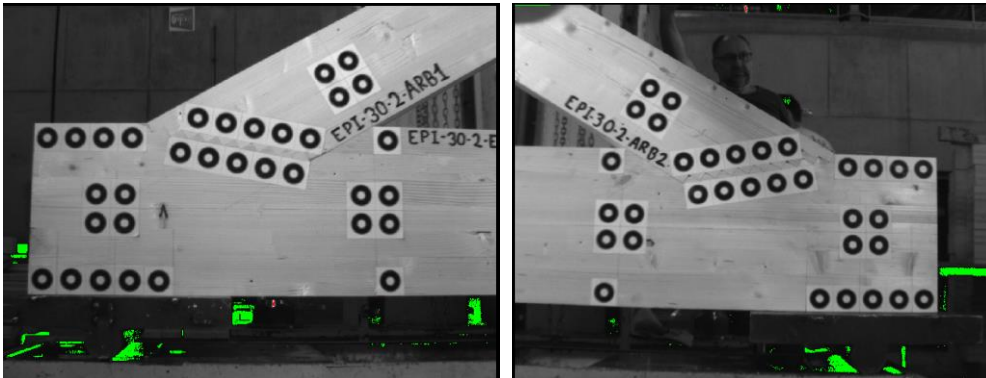


Définition	Cast3M	EPI-30-2
Débord de l'appui	AAPP	0
Longueur de l'appui	LAPP	300
Hauteur cibles	LCIBL	50
Hauteur cibles objets 7 et 8	LCIBL2	50

Fichiers caméra :

EPI30-2001L1.8cap du 01/06/2021 à 11:56 : EPI30-2-ARB1

EPI30-2001L2.8cap du 01/06/2021 à 11:56 : EPI30-2-ARB2



Résultats MV fichier : 60_Dépouillement synthèse 30 v2.xlsm

2.2 Essais $\alpha = 30^\circ$ - Validation du modèle par éléments finis

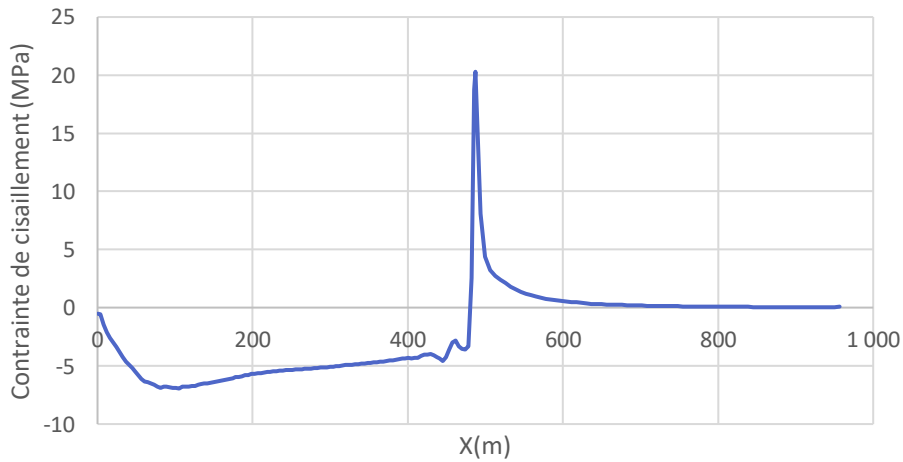
Résultats des essais

Sample	Side	Failure side	Ncyl,fail [kN]	Nraft,fail [kN]	Nfail,X [kN]	Nfail,Y [kN]	ufail,7d8,X [mm]	K7d8,X [kN/mm]	ufail,7d8,Y [mm]	K7d8,Y [kN/mm]	ufail,8d2,Y [mm]	K8d2,Y [kN/mm]	ufail,2d6,Y [mm]	K2d6,Y [kN/mm]	Nraft,est [kN]	Δ rel [%]	Nest,X [kN]	Nest,Y [kN]
EPI-30-1	L-L1	Right-L2	292	292	253	146	0.44	821	0.74	210	1.61	100	2.44	72	48	608.25%	42	24
	R-L2																	
EPI-30-2	L-L1	Right-L2	259	259	224	129	0.29	865	0.58	234	1.33	109	2.71	53	48	539.12%	42	24
	R-L2																	
Mean			275	275	238	138	0.36	809	0.57	268	1.43	103	2.40	65	48	573.68%	42	24

Résultats Cast3M

Nfail,Y [kN]	ufail,7d8,X [mm]	K7d8,X [kN/mm]	ufail,7d8,Y [mm]	K7d8,Y [kN/mm]	ufail,8d2,Y [mm]	K8d2,Y [kN/mm]	ufail,2d6,Y [mm]	K2d6,Y [kN/mm]
151	1.31	189	0.30	480	1.67	91	1.63	91

CS_91



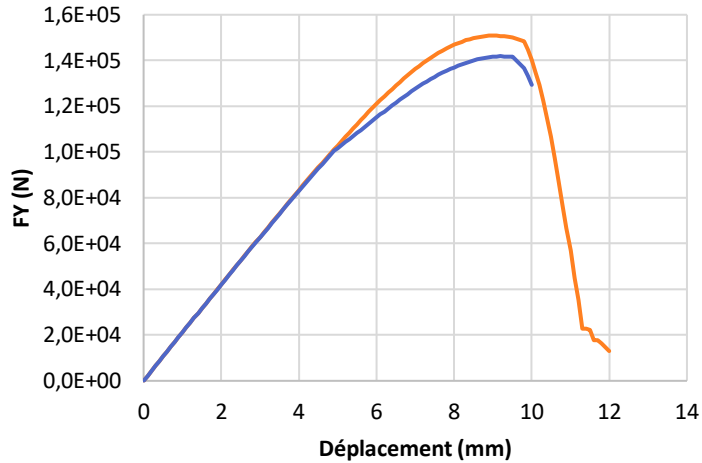
Effort max	151 kN
Effort normal entrain	247 kN
Moment entrain	5,5 kN.m
Effort normal arbaletrier	-290 kN
Moment arbaletrier	-1,1 kN.m
EXCAR	3,73 mm
EXCEN	22,22 mm
EXCAP	200,00 mm

Les données concordent → le modèle est donc valide.

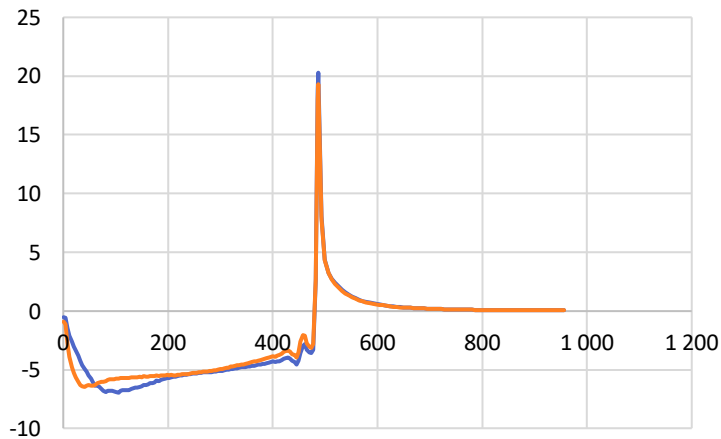
2.2 Essais $\alpha = 30^\circ$ - Validation du modèle par éléments finis

Ajout du frottement CFMU = 0.001 puis 0.1

Fy en fonction du déplacement : avec (bleu) et sans (orange) frottement



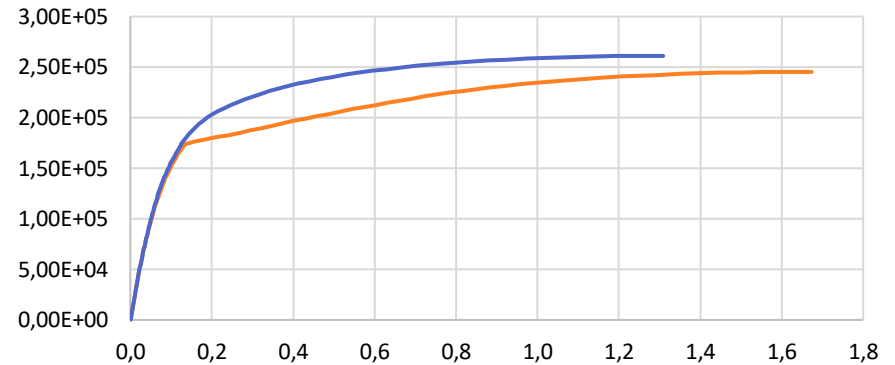
Contrainte de cisaillement le long du joint



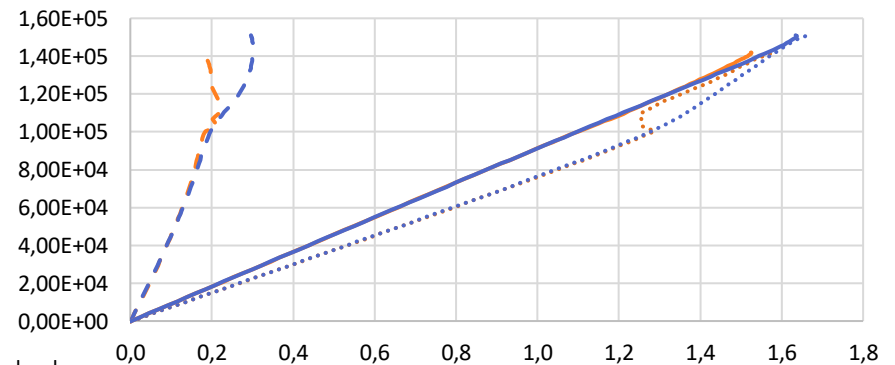
Le frottement a une influence négligeable sur les résultats et le calcul ne le prendra donc pas en compte afin de gagner en temps de calcul.

		CFMU = 0.001	CFMU = 0.1
Effort max	151 kN	142	142
Effort normal entrain	247 kN	236	236
Moment entrain	5,5 kN.m	5,3	5,3
Effort normal arbalétrier	-290 kN	-284	-284
Moment arbalétrier	-1,1 N.m	-0,19	-0,19
EXCAR	3,73 mm	0,67	0,67
EXCEN	22,22 mm	22,32	22,32
EXCAP	200,00 mm	200,00	200,00

FX en fonction du déplacement : 7d8



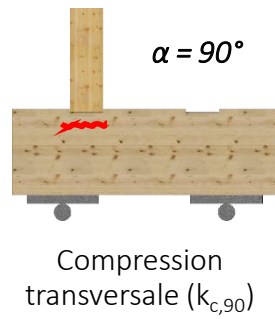
FY en fonction du déplacement : 2d6 (---) 7d8 (- - -) 8d2 (...)



2.3 Autres essais

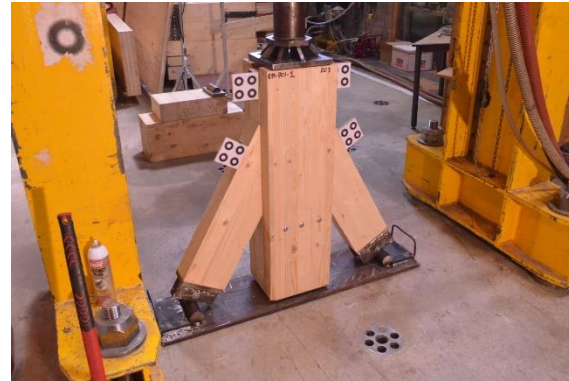
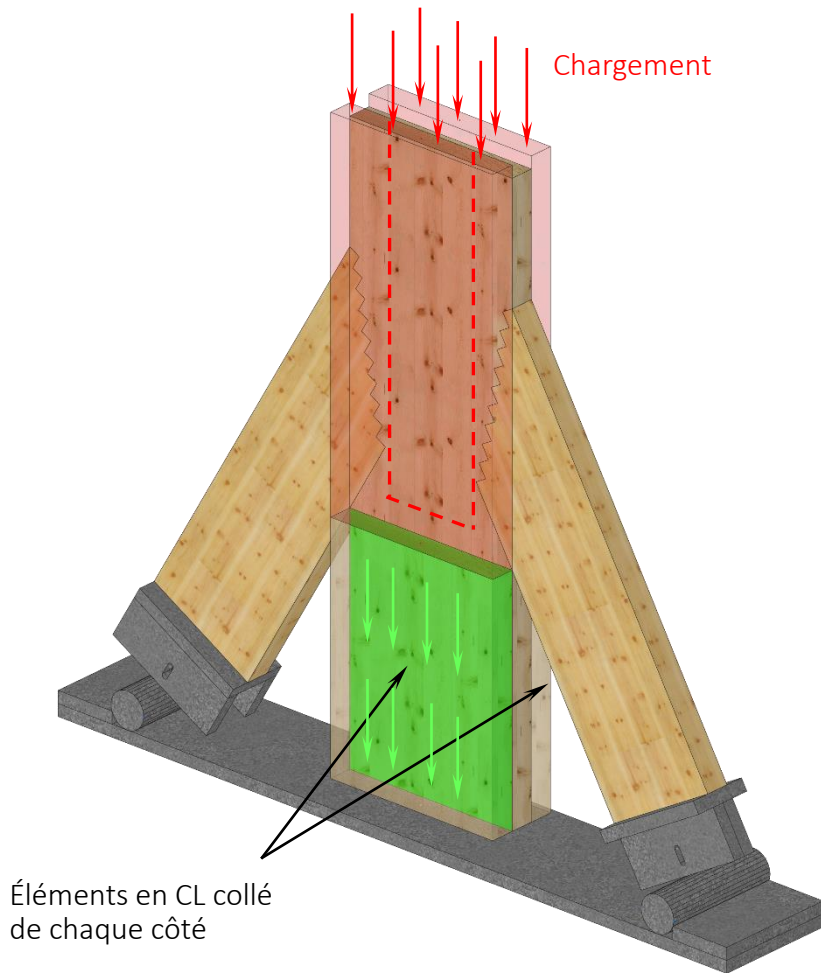
Les essais suivants en sont pas utilisés pour valider le modèle éléments finis.

Essais 90°



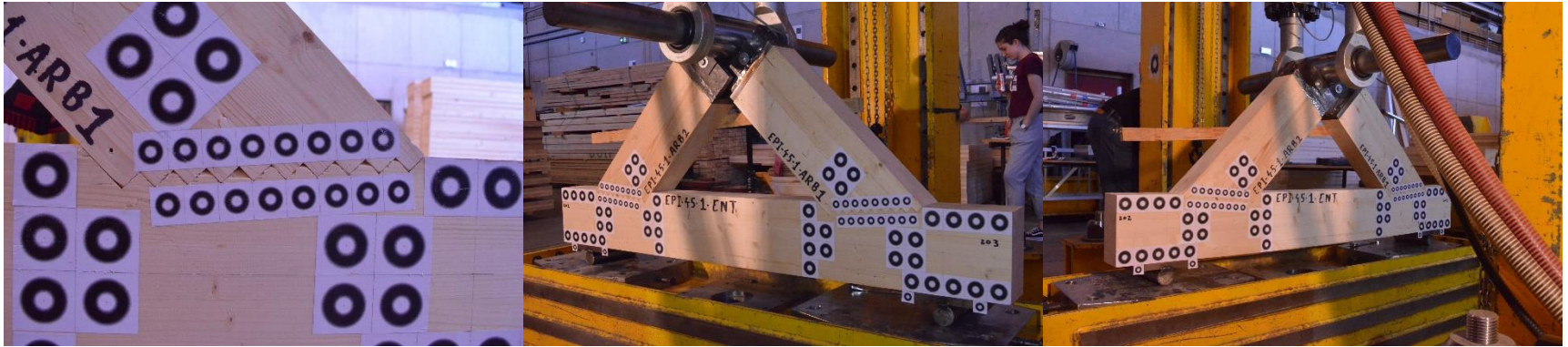
2.3 Autres essais

Essais 30° - configuration poinçon



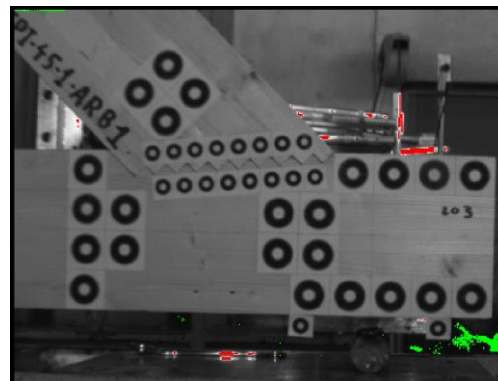
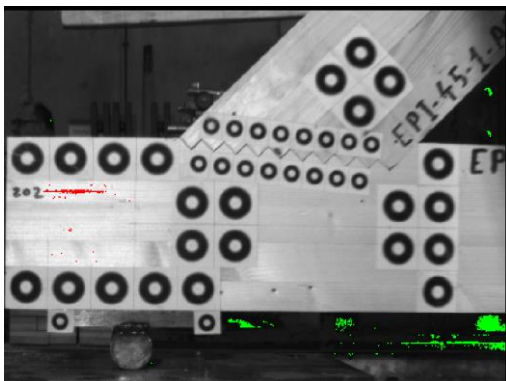
2.3 Autres essais

Essais 45°



EPI45-1006L1.8cap du 28/05/2021 à 18:06 : EPI45-1-ARB2 – 202

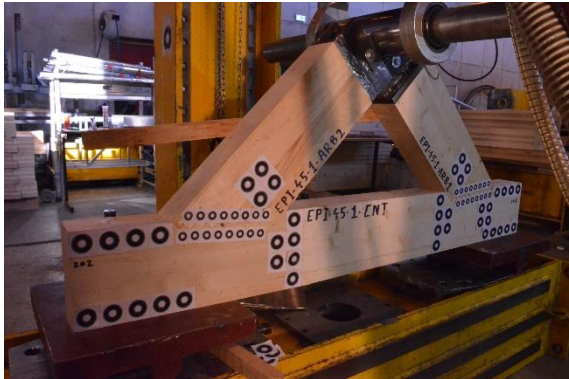
EPI45-1006L2.8cap du 28/05/2021 à 18:06 : EPI45-1-ARB1 – 203



Définition	Cast3M	EPI-45-1
Débord de l'appui	AAPP	50
Longueur de l'appui	LAPP	100
Hauteur cibles	LCIBL	50
Hauteur cibles objets 7 et 8	LCIBL2	31

2.3 Autres essais

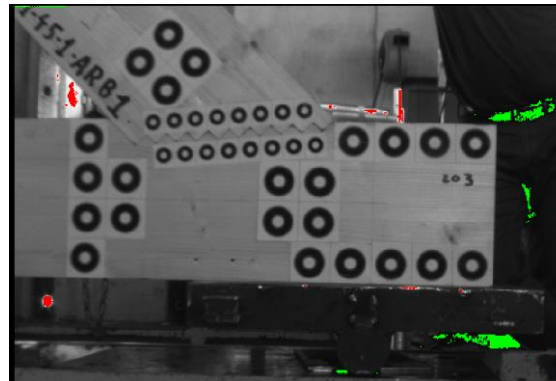
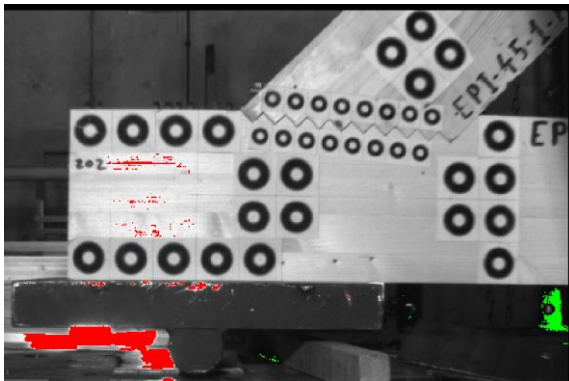
Essais 45°



Définition	Cast3M	EPI-45-1
Débord de l'appui	AAPP	0
Longueur de l'appui	LAPP	300
Hauteur cibles	LCIBL	50
Hauteur cibles objets 7 et 8	LCIBL2	31

EPI45-1007L1.8cap du 28/05/2021 à 18:55 : EPI-45-1-ARB2 – 202

EPI45-1007L2.8cap du 28/05/2021 à 18:55 : EPI-45-1-ARB1 – 203



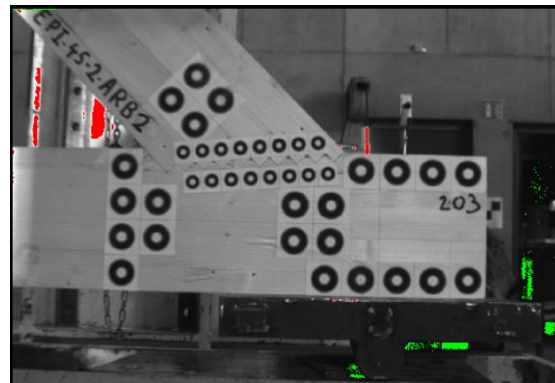
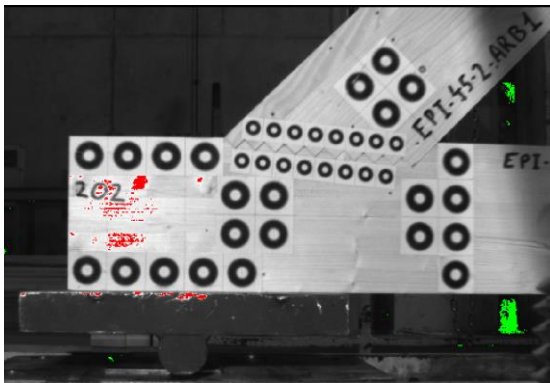
2.3 Autres essais

Essais 45°



EPI45-2001L1.8cap du 31/05/2021 à 15:16 : EPI-45-2-ARB1 – 202

EPI45-2001L2.8cap du 31/05/2021 à 15:16 : EPI-45-2-ARB2 – 203



Définition	Cast3M	EPI-45-2
Débord de l'appui	AAPP	0
Longueur de l'appui	LAPP	300
Hauteur cibles	LCIBL	50
Hauteur cibles objets 7 et 8	LCIBL2	31

Rupture fragile de la section réduite de l'entrait aux efforts de cisaillement ou de flexion/traction.

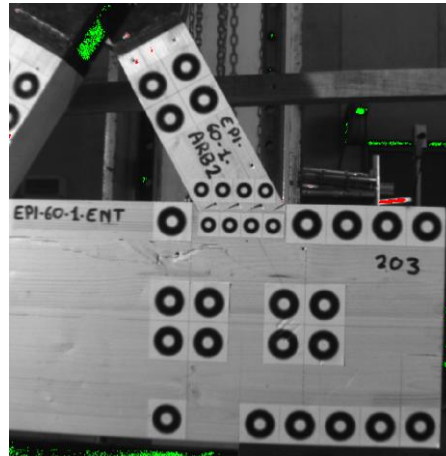
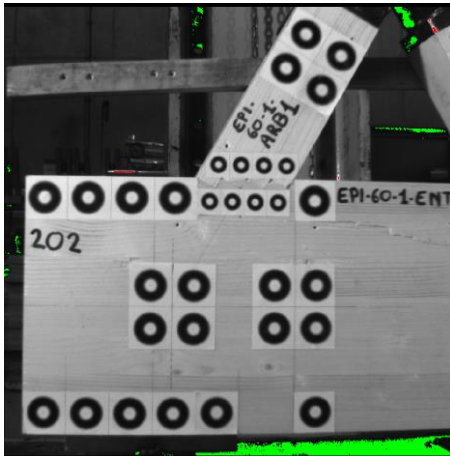


2.3 Autres essais

Essais 60°

EPI60-1001L1.8cap du 31/05/2021 à 17:41 : EPI60-1-ARB1 – 202

EPI60-1001L2.8cap du 31/05/2021 à 17:41 : EPI60-1-ARB2 – 203



Définition	Cast3M	EPI-60-1
Débord de l'appui	AAPP	50
Longueur de l'appui	LAPP	100
Hauteur cibles	LCIBL	50
Hauteur cibles objets 7 et 8	LCIBL2	31

Rupture ductile en compression à l'angle de l'entrait sous l'arbalétrier



3. Études paramétriques

Les 4 configurations de fermes testées ont été modélisées dans le logiciel de modélisation par éléments finis Cast3M. Certains paramètres du modèle, tels que les conditions de contact entre l'entrait et l'arbalétrier, sont caractérisés grâce aux essais. Ensuite, le modèle Cast3M permet d'identifier la longueur d'excentrement (l_{exc}) et d'obtenir la répartition de la contrainte de cisaillement ($l_{v,eff}$) pour toutes les configurations d'essais. Une fois que le modèle prédit correctement les résistances et les déplacements obtenus par essais, n'importe quelle configuration d'embranchement peut être étudiée par éléments finis.

Les longueurs d'excentrement déterminées avec Cast3M ainsi que les raideurs d'assemblage mesurées en essais permettent de construire un modèle simplifié barres, utilisable sur un logiciel du commerce et prédisant correctement les déplacements et les résistances d'un assemblage par embrèvements multiples.

Le modèle a été validé pour les essais à 30°. Des études paramétriques afin de comprendre le comportement mécanique de l'assemblage par embrèvement multiple ont donc été réalisées. Le tableau ci-dessous donne les paramètres d'entrée pouvant varier.

Angle de l'arbalétrier	ALPHA	20-30-45
Hauteur de l'entrait	HE	200-300-400
Hauteur de l'arbalétrier	HA	...
Longueur du talon	LTAL	100-...
Débord de l'appui	AAPP	minimiser la flexion dans l'entrait
Longueur de l'appui	LAPP	grande
Nombre d'entailles	NGR	à modifier selon alpha
Angle de progression des entailles	BETA	minimum de 5 mm (comme embrèvements arrières)

3. Études paramétriques

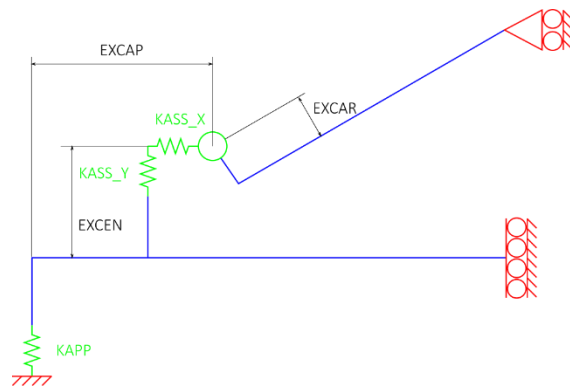
Données en sortie

Le modèle permet d'obtenir différentes données qui sont listées ci-dessous :

- Effort à rupture (Fmax)
- Courbe de cisaillement le long du joint → fonction mathématique (intégrale) → calcul de $l_{effective}$

$$l_{eff} = \frac{F_{rupture}}{f_{v,mean} \times b} = \frac{b \int_0^{l_{cis}} \tau \times dx}{f_{v,mean} \times b} = \frac{\int_0^{l_{cis}} \tau \times dx}{f_{v,mean}}$$

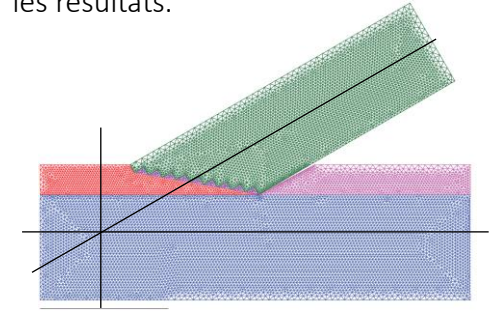
- Pour modèle filaire à 50 % de Fmax:
 - Excentricité de la charge sur l'arbalétrier : EXCAR (mm)
 - Décalage appui / assemblage : EXCAP (mm)
 - Excentricité de la charge sur l'entrait : EXCEN (mm)
 - Courbe FX (kN) en fct du dpl (mm) 7d8 → calcul de $K_{ass,x} = K7d8X$
 - Courbes FY (kN) en fct du dpl 7d8 (mm) et 8d2 → calcul de $K_{ass,y} = K7d8Y + K8d2Y$
 - Courbes FY (kN) en fct du dpl 2d6 (mm) → calcul de $K_{app} = K2d6Y$



3.1 Appui sur axe neutre

Une première étude a été menée pour $\alpha = 30^\circ$ et des conditions limites et un chargement de l'option 3, soit appui sur axe neutre. Les autres paramètres d'entrée constants sont donnés dans le tableau ci-dessous. Un seul critère a été varié : longueur du talon. De plus, des simulations ont été effectuées avec et sans frottement afin de caractériser son influence sur les résultats.

Angle de l'arbalétrier	ALPHA	30
Hauteur de l'entrait	HE	300
Hauteur de l'arbalétrier	HA	200
Débord de l'appui	AAPP	0
Nombre d'entailles	NGR	10
Angle progression entailles	BETA	10
Matériau	MTB	Épicéa
Conditions appui	VAR_APPUI	3



Premiers résultats

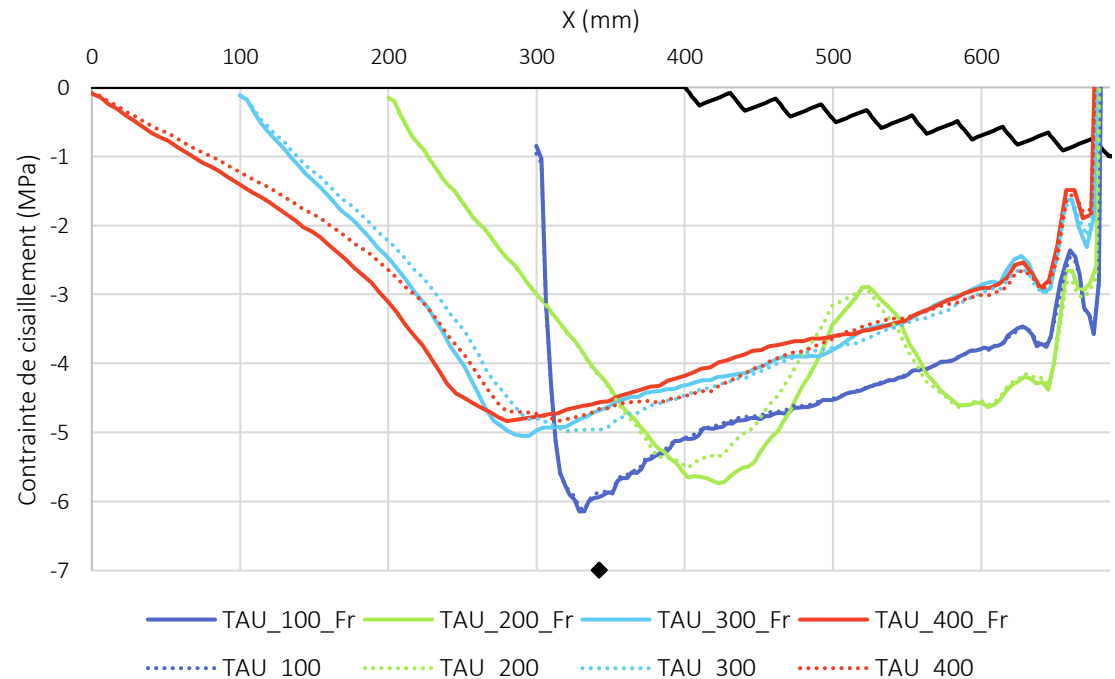
LTAL = [100; 200; 300; 400]

La position du centre de l'appui est constante.

La longueur de l'appui est modifiée en fonction de LTAL.

- L'effet du frottement entre l'entrait et l'arbalétrier est négligeable. Son omission permet de gagner en temps de calcul.
- L'allure de la courbe de cisaillement pour LTAL = 200 est différente des autres courbes.
- $f_{v,mean} = 4.64$ MPa, or la contrainte de cisaillement dépasse cette valeur : problème dans la définition du joint ?
- Comme la contrainte de cisaillement est supérieure à $f_{v,mean}$ lors du calcul de $l_{effective}$ la contrainte de cisaillement maximum atteinte le long du joint sera utilisée.

Contrainte de cisaillement le long du joint en fonction de la longueur du talon avec et sans frottement



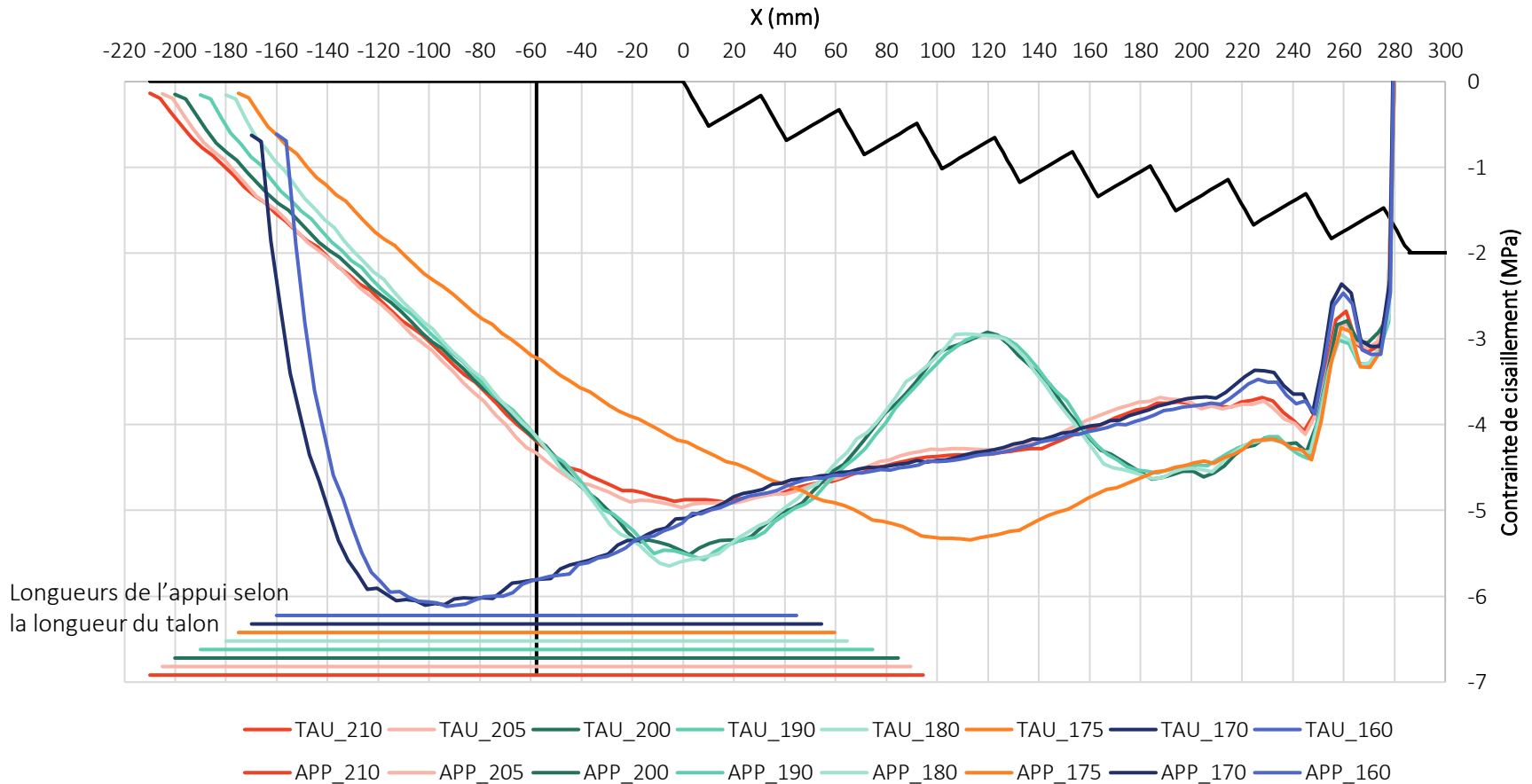
3.1 Appui sur axe neutre

$\alpha = 30^\circ$: variation de la longueur du talon (avec et sans frottement)

Étude de l'allure de la courbe de cisaillement : 4 allures

- LTAL < 175 mm : bleu foncé
- LTAL = 175 mm : orange
- LTAL compris entre 175 et 205 mm : bleu clair
- LTAL \geq 205 mm : rouge

Contrainte de cisaillement le long du joint en fonction de la longueur du talon

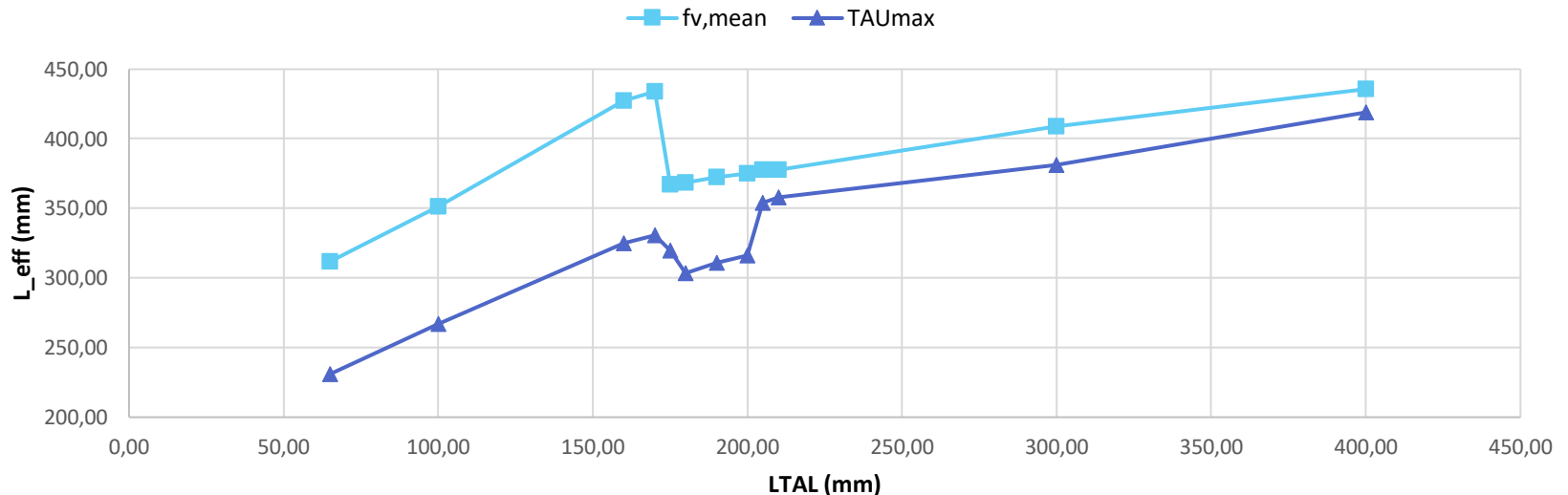


3.1 Appui sur axe neutre

$\alpha = 30^\circ$: variation de la longueur du talon (avec et sans frottement)

Remarque : LTAL = 65 mm est le plus petit talon possible pour ALPHA = 30° et appui sur à l'intersection des axes neutre (pour un appui d'une longueur minimale de 10 mm)

Longueur du talon	LTAL	65	100	200	300	400				
Longueur de l'appui	LAPP	15	85	285	485	685				
Coeff. de frottement	CFMU	NAN	NAN	0.25	NAN	0.25	NAN	0.25	NAN	0.25
Longueur cisailée	l_cis	351	387	487	587	687				
Longueur effective (fvmean)	l_eff	311	351	352	364	370	409	402	436	427
Longueur effective (TAUmax)	l_eff	231	267	267	306	300	381	370	419	411
Effort maximum (kN)	F_MAX	97.32	108.51	107.23	108.29	109.39	115.39	115.52	122.93	123.89
Moment entrain (kN.m)	MEN	7.79	3.16	3.07	2.20	2.29	2.16	2.15	2.16	2.15

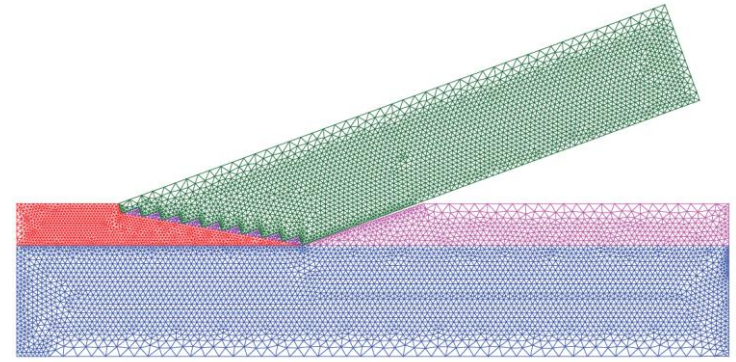


Le graphique représente la longueur de cisaillement effective en fonction de la longueur du talon (l'axe de l'appui étant situé toujours au même point). La courbe bleu clair résulte du calcul de l_{eff} avec $fv,mean$, la courbe bleu foncé résulte du calcul de l_{eff} avec la contrainte maximale (TAUmax).

3.1 Appui sur axe neutre

La même étude a été menée avec $\alpha = 20^\circ$. Les tableaux ci-dessous donne les paramètres d'entrée et les résultats pour des longueur de talon allant de 200 à 500 mm.

Angle de l'arbalétrier	ALPHA	20
Hauteur de l'entrait	HE	300
Hauteur de l'arbalétrier	HA	200
Débord de l'appui	AAPP	0
Nombre d'entailles	NGR	10
Angle de progression des entailles	BETA	10
Matériau	MTB	Épicéa
Conditions appui	VAR_APPUI	3
Déplacement	DPL	-15

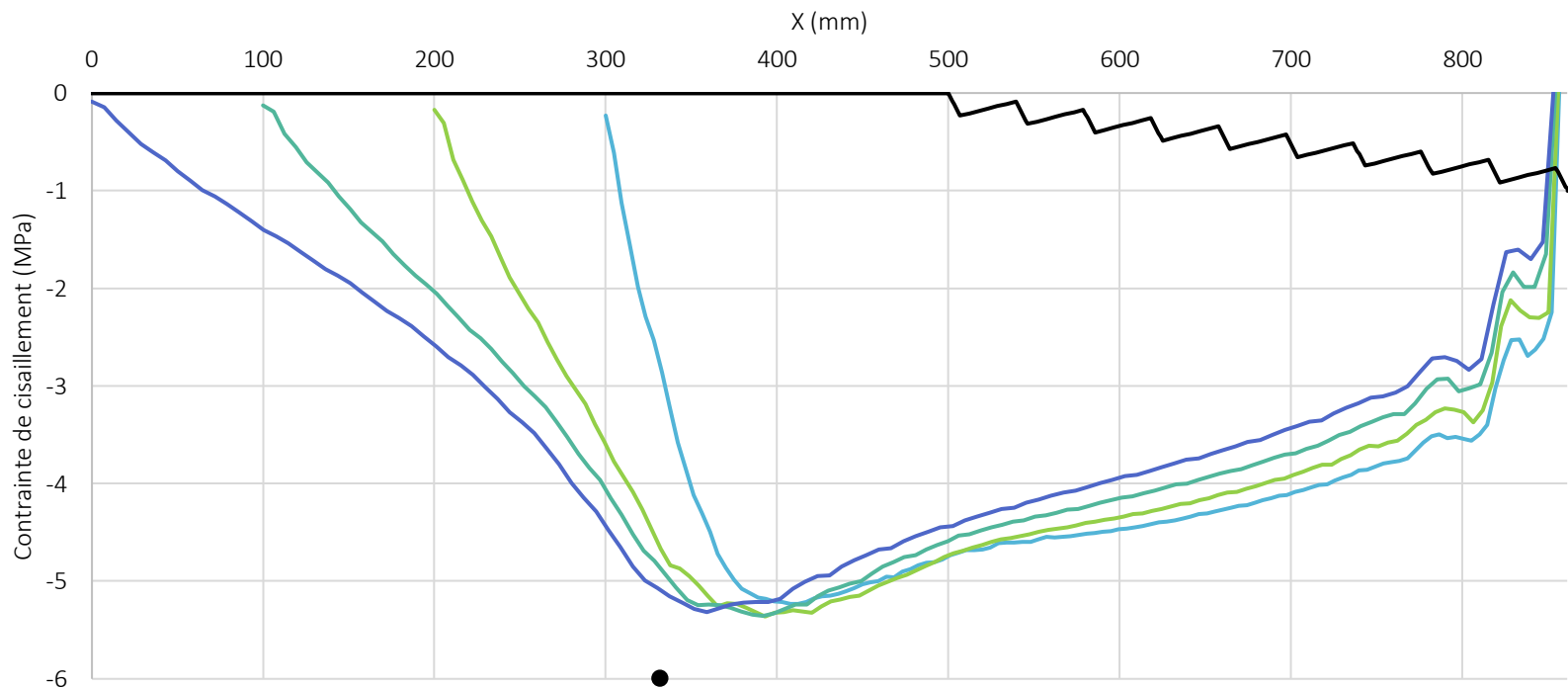


Longueur du talon	LTAL	200	300	400	500				
Longueur de l'appui	LAPP	63.34	263.34	463.34	663.34				
Coeff. de frottement	CFMU	NAN	0.25	NAN	0.25	NAN	0.25	NAN	0.25
Longueur cisailée	l_cis	561	671	761	861				
Longueur effective	l_eff	492	549	578	602				
Effort maximum (kN)	F_MAX	89.77	99.48	104.62	108.79				
Effort entrait (kN)	NEN	120.74	135.37	141.59	148.12				
Moment entrait (kN.m)	MEN	4.63	4.84	4.99	5.21				

3.1 Appui sur axe neutre

Le tableaux ci-dessous donne les résultats pour des longueur de talon allant de 200 à 500 mm. La contrainte de cisaillement le long du joint est représentée sur le graphique (le point noir représente le point d'appui).

Longueur du talon	LTAL	200	300	400	500
Longueur de l'appui	LAPP	63.34	263.34	463.34	663.34
Coeff. de frottement	CFMU	NAN	0.25	NAN	0.25
Longueur cisailée	l_cis	561	671	761	861
Longueur effective	l_eff	492	549	578	602
Effort maximum (kN)	F_MAX	89.77	99.48	104.62	108.79
Effort entrain (kN)	NEN	120.74	135.37	141.59	148.12
Moment entrain (kN.m)	MEN	4.63	4.84	4.99	5.21

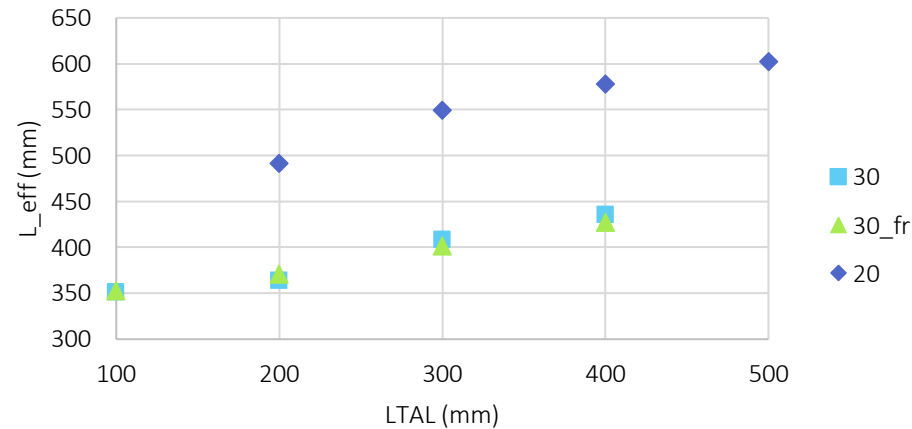


3.1 Appui sur axe neutre

Les résultats pour $\alpha = 20^\circ$ et 30° sont résumés dans le tableau et par le graphique ci-dessous.

Longueur du talon	LTAL	200	300	400	500				
Longueur de l'appui	LAPP	63.34	263.34	463.34	663.34				
Coeff. de frottement	CFMU	NAN	0.25	NAN	0.25	NAN	0.25	NAN	0.25
Longueur cisailée	l_{cis}	561	671	761	861				
Longueur effective	l_{eff}	492	549	578	602				
Effort maximum (kN)	F_MAX	89.77	99.48	104.62	108.79				
Effort entrain (kN)	NEN	120.74	135.37	141.59	148.12				
Moment entrain (kN.m)	MEN	4.63	4.84	4.99	5.21				

Longueur effective en fonction de la longueur du talon
(appui centré axe neutre)



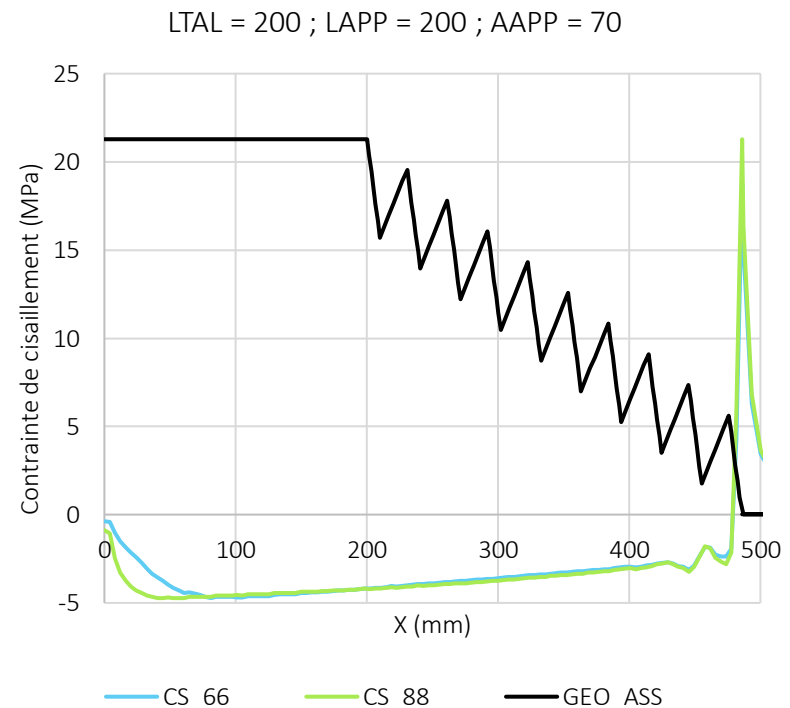
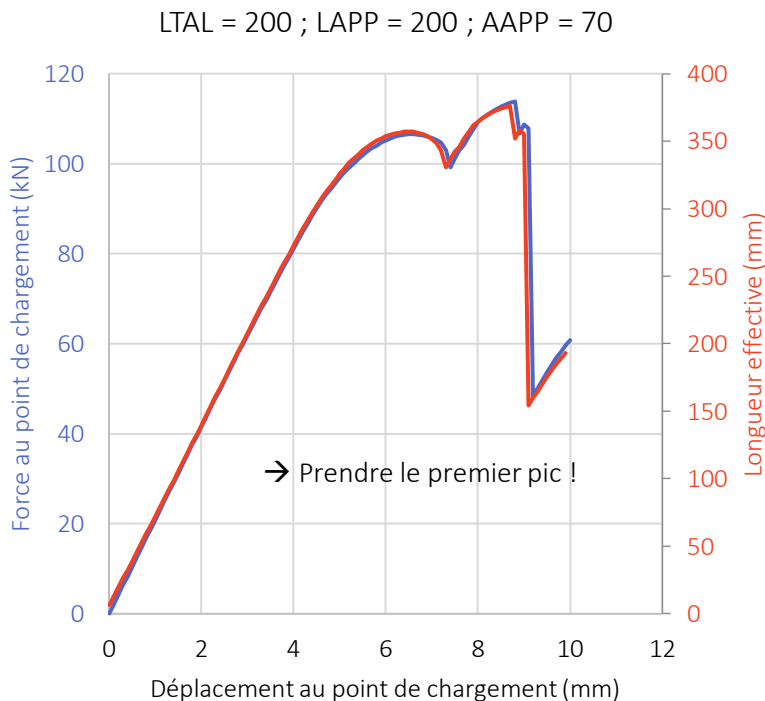
3.2 Appui et débord d'appui variables

Une autre étude a été menée pour $\alpha = 30^\circ$ et des conditions limites et un chargement de l'option 2 avec un longueur de talon de 200 mm. Les paramètres d'entrée constants sont donnés dans le tableau ci-dessous. Deux critères ont été variés : la longueur d'appui et le débord de l'appui.

Le premier graphique montre la force au point de chargement en fonction de déplacement au point de chargement dans un cas particulier où deux pics sont visibles sur la courbe. Pour les calculs de la longueur effective seul le premier pic sera pris en compte.

Le deuxième graphique (à droite) présente l'allure de la contrainte de cisaillement le long du joint (la géométrie du joint étant représentée en noire) pour les deux pics.

Angle de l'arbalétrier	ALPHA	30
Hauteur de l'entrait	HE	300
Hauteur de l'arbalétrier	HA	200
Longueur du talon	LTAL	200
Nombre d'entailles	NGR	10
Angle de progression des entailles	BETA	10
Matériau	MTB	Épicéa
Conditions appui	VAR_APPUI	2
Frottement		NON
Déplacement	DPL	-10

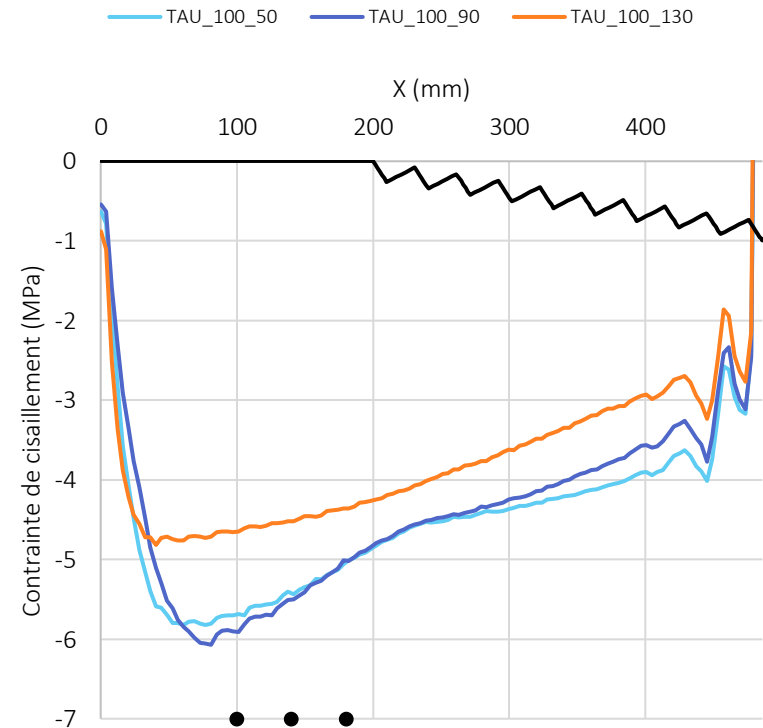
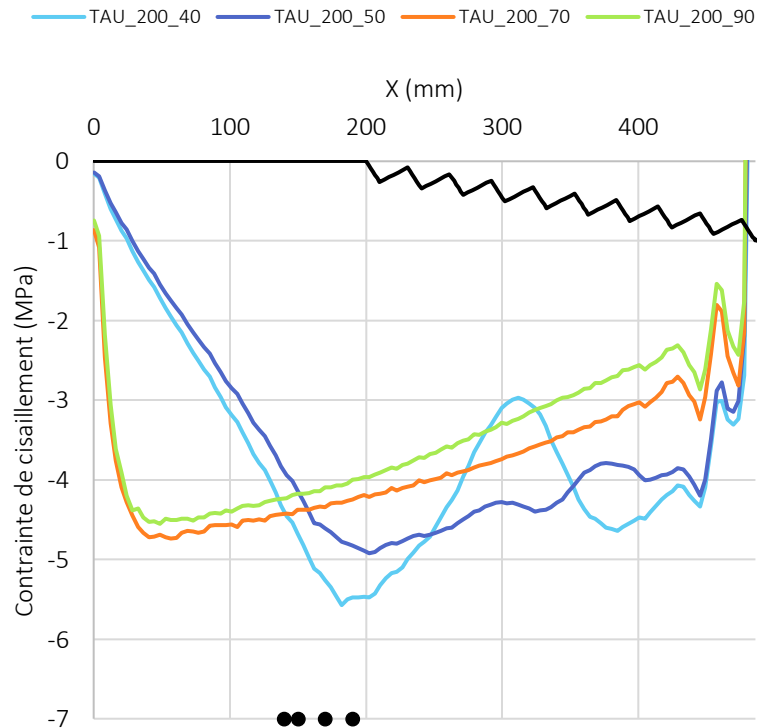


3.2 Appui et débord d'appui variables

Longueur de l'appui	LAPP	100	100	100	200	200	200	200
Débord appui	AAPP	50	90	130	40	50	70	90
Longueur cisailée	l_{cis}	486	486	486	486	486	486	486
Longueur effective	l_{eff}	455	440	376	375	362	376	344
Effort maximum	F_MAX	131.41	129.03	113.94	109.71	106.99	113.81	105.33
Effort entrain	NEN	113.98	109.19	93.87	94.44	92.93	97.35	88.14
Moment entrain	MEN	4.36	2.68	1.00	2.35	1.98	1.41	0.65

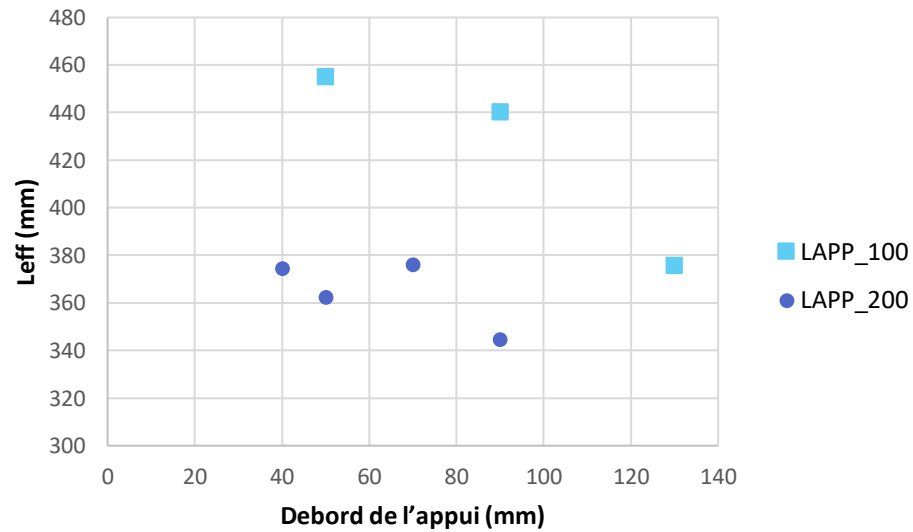
LAPP = 200 mm

LAPP = 100 mm



3.2 Appui et débord d'appui variables

Longueur de l'appui	LAPP	100	100	100	200	200	200	200
Débord appui	AAPP	50	90	130	40	50	70	90
Longueur cisailée	l_cis	486	486	486	486	486	486	486
Longueur effective	l_eff	455	440	376	375	362	376	344
Effort maximum	F_MAX	131.41	129.03	113.94	109.71	106.99	113.81	105.33
Effort entrain	NEN	113.98	109.19	93.87	94.44	92.93	97.35	88.14
Moment entrain	MEN	4.36	2.68	1.00	2.35	1.98	1.41	0.65



3.2 Appui et débord d'appui variables

Une autre étude a été menée pour $\alpha = 30^\circ$ et des conditions limites et un chargement de l'option 2 dont les paramètres d'entrée constants sont donnés dans le tableau ci-dessous. La longueur d'appui, le débord de l'appui et la longueur du talon sont variable et doivent correspondre au moment où le moment dans l'entrait est proche de zéro.

Angle de l'arbalétrier	ALPHA	30
Hauteur de l'entrait	HE	300
Hauteur de l'arbalétrier	HA	200
Débord de l'appui	AAPP	Variable
Longueur appui	LAPP	306
Longueur talon	LTAL	400
Nombre d'entailles	NGR	10
Angle progression entailles	BETA	10
Matériau	MTB	Épicéa
Conditions appui	VAR_APPUI	2

→ LAPP = projection sur X de la longueur de l'entaille
 $LAPP = \cos(\text{Beta}) \times HA / \sin(\text{Beta} + \text{Alpha}) = 306 \text{ mm}$

→ LTAL = longueur suffisante pour pouvoir placer l'axe de l'appui au point d'intersection des axes neutres e l'arbalétrier et de l'entrait
 $X_{\text{inter}} = (HA / 2 / \cos(\text{Alpha})) - (HA / 2 / \tan(\text{Alpha})) = -58 \text{ mm}$
 Donc $LTAL > 364 \text{ mm}$

Boucle sur AAPP pour trouver quand MEN est proche de zéro.

Attention : déplacement de 10 mm jusqu'à AAPP = 155 puis 6 mm car ici la rupture ne nous intéresse pas.

→ Le moment dans l'entrait est proche de zéro pour AAPP = 250 mm

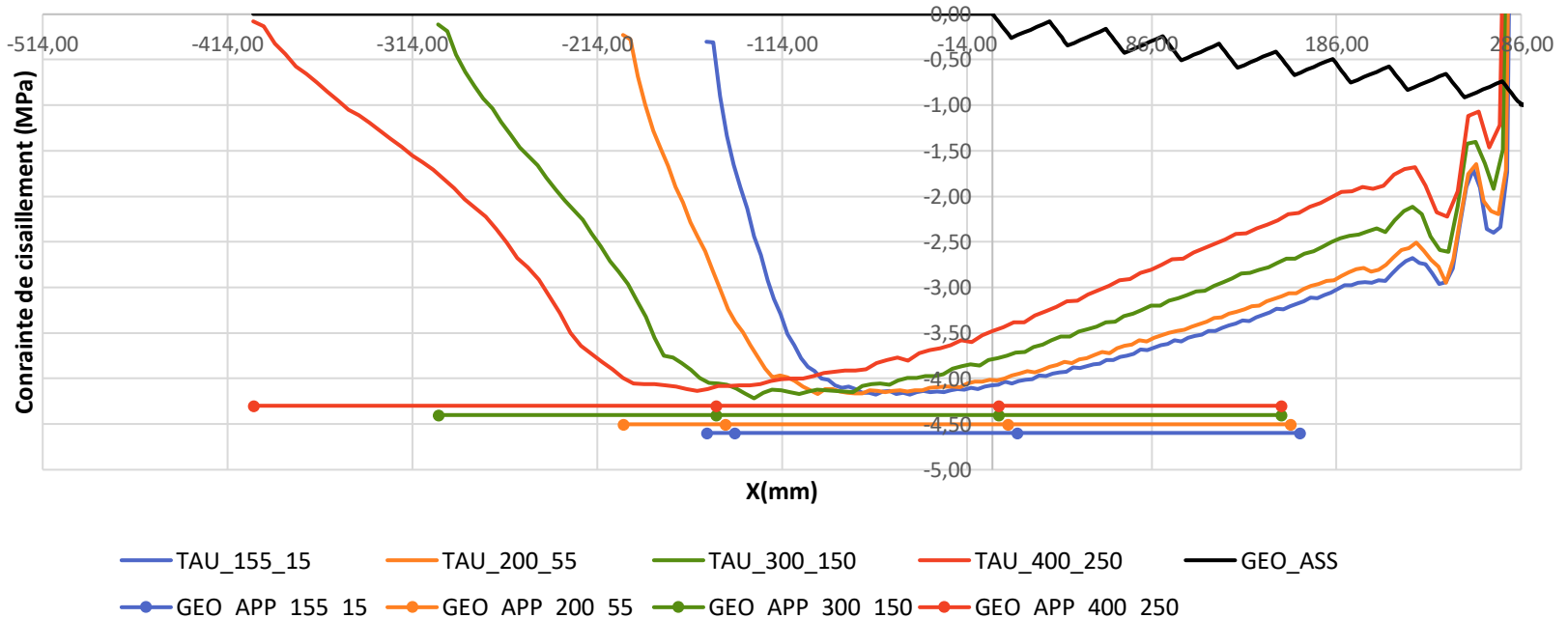
LTAL	400	300	200	155
AAPP	250	150	55	15
F_EXC	84	88	86	88
MEN	0.	0.01	0.	0.06
EXCEN	0.01	0.04	0.03	0.47
EXCAR	2.15	5.15	5.59	6.09
EXCAP	170.77	171.82	170.75	169.77
Fmax	114	108	99	94
TAU_max	4.13	4.22	4.17	4.18
l_cis	686	586	486	441
L_eff	441	408	373	347

3.2 Appui et débord d'appui variables

Le graphique donne l'allure de la contrainte de cisaillement le long du joint lorsque le moment dans l'entrait est proche de zéro pour différente longueur de talon (l'appui est représenté par des droites sont les courbes).

Angle de l'arbalétrier	ALPHA	30
Hauteur de l'entrait	HE	300
Hauteur de l'arbalétrier	HA	200
Débord de l'appui	AAPP	Variable
Longueur appui	LAPP	306
Longueur talon	LTAL	400
Nombre d'entailles	NGR	10
Angle progression entailles	BETA	10
Matériau	MTB	Épicéa
Conditions appui	VAR_APPUI	2

LTAL	400	300	200	155
AAPP	250	150	55	15
Fmax	114	108	99	94
TAU_max	4.13	4.22	4.17	4.18
l_cis	686	586	486	441
L_eff	441	408	373	347



3.2 Appui continu

Une étude a été menée à partir de l'option 1, soit les conditions limites de type poinçon soit un appui tout le long de l'entrait. Ici, seul la longueur du talon est variable. Des simulation pour $\alpha = 20^\circ$ et 30° ont été réalisées.

Angle de l'arbalétrier	ALPHA	30
Hauteur de l'entrait	HE	300
Hauteur de l'arbalétrier	HA	200
Nombre d'entailles	NGR	10
Angle de progression des entailles	BETA	10
Matériau	MTB	Épicéa
Conditions appui	VAR_APPUI	1
Frottement		NON

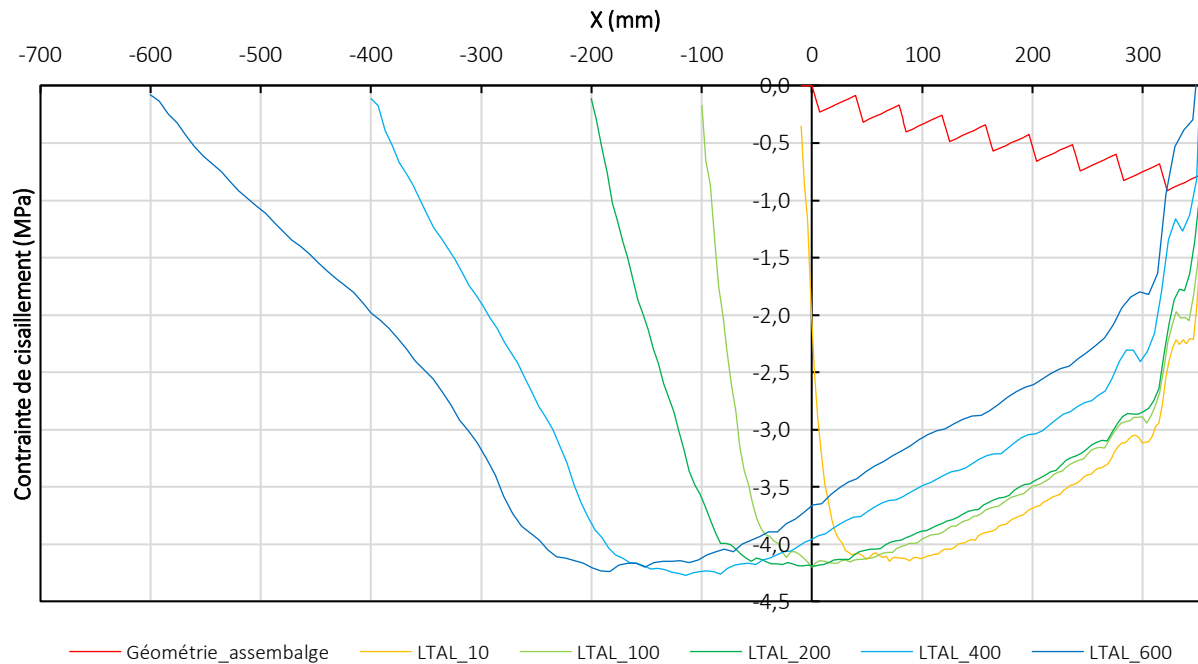
Longueur talon	LTAL	10	100	200	400	600
Longueur cisailée	I_cis	296	386	486	686	886
Longueur effective	I_eff	247	313	377	467	531
Effort maximum	F_MAX	70.92	84.37	98.42	119.54	133.63
Réaction	FY	49.72	55.44	59.54	66.44	75.10
Moment entrait	MEN	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Effort entrait	NEN	59.51	74.51	87.67	106.78	123.89
Moment arbalétrier	MAR	-0.64	-0.48	-0.31	-0.15	-0.10
Effort arbalétrier	NAR	-71.11	-87.82	-102.40	-123.84	-143.42
Excentricité arba.	EXCAR	9.02	5.44	3.06	1.17	0.68
Excentricité entrait	EXCEN	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Excentricité appui	EXCAP	4.13	50.84	95.44	145.03	160.75

3.2 Appui continu

Résultats pour $\alpha = 30^\circ$

Angle de l'arbalétrier	ALPHA	30
Hauteur de l'entrait	HE	300
Hauteur de l'arbalétrier	HA	200
Nombre d'entailles	NGR	10
Angle de progression des entailles	BETA	10
Matériau	MTB	Épicéa
Conditions appui	VAR_APPUI	1
Frottement		NON

LTAL	10	100	200	400	600
l_{cis}	296	386	486	686	886
l_{eff}	247	313	377	467	531



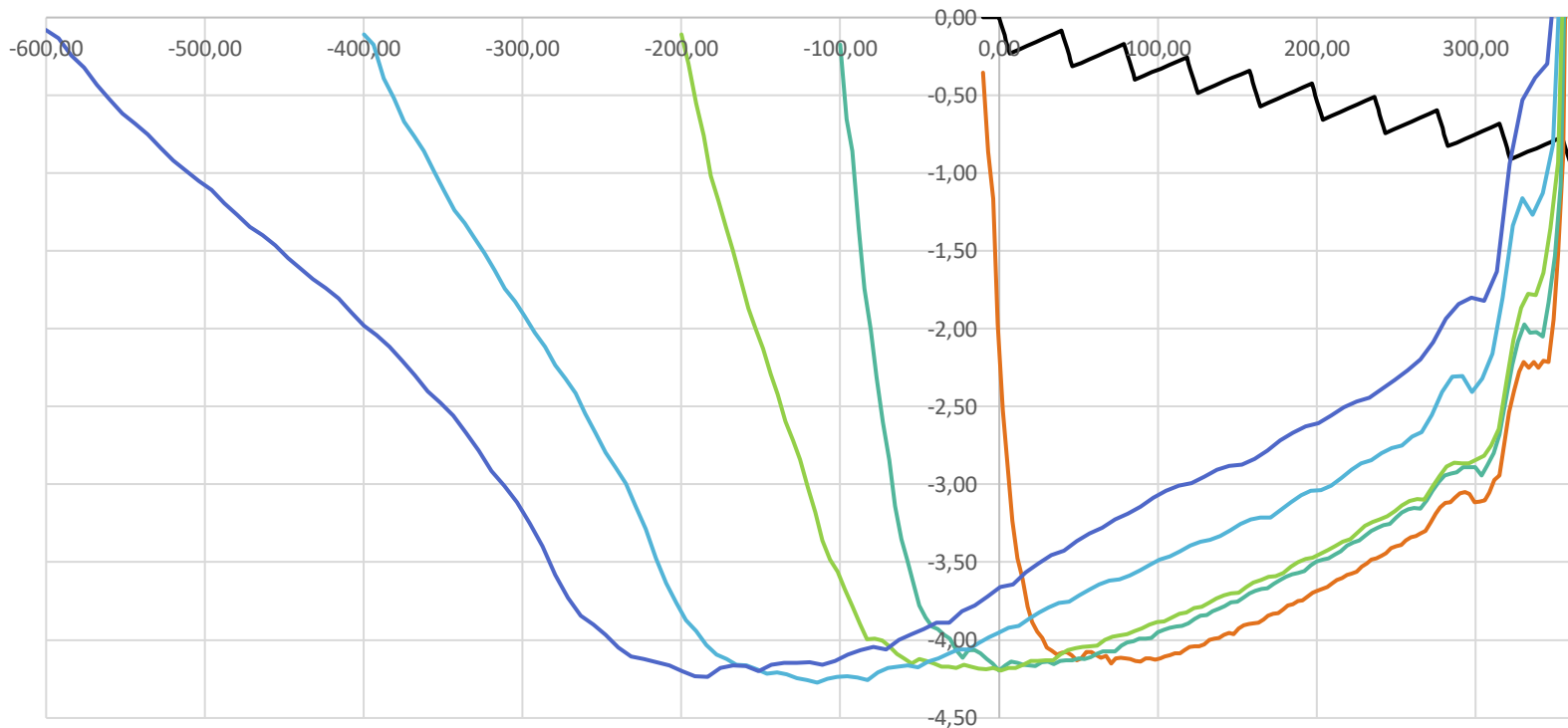
3.2 Appui continu

Résultats pour $\alpha = 20^\circ$

Angle de l'arbalétrier	ALPHA	20
Hauteur de l'entrait	HE	300
Hauteur de l'arbalétrier	HA	200
Nombre d'entailles	NGR	10
Angle de progression des entailles	BETA	10
Matériau	MTB	Épicéa
Conditions appui	VAR_APPUI	1
Frottement		NON

LTAL	10	100	200	400	600
l_{cis}	371	461	561	761	961
l_{eff}	305	367	431	529	603

Contrainte de cisaillement (MPa) le long du joint (mm)



3.2 Appui continu

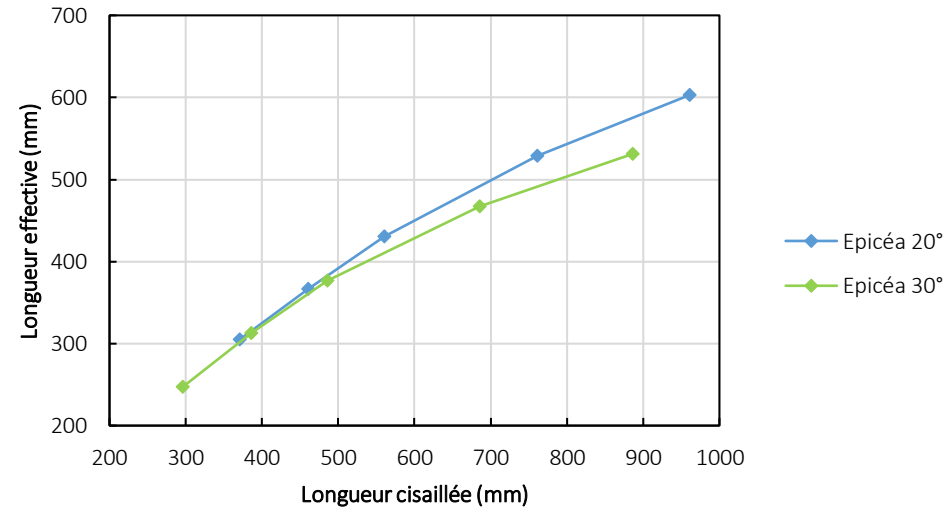
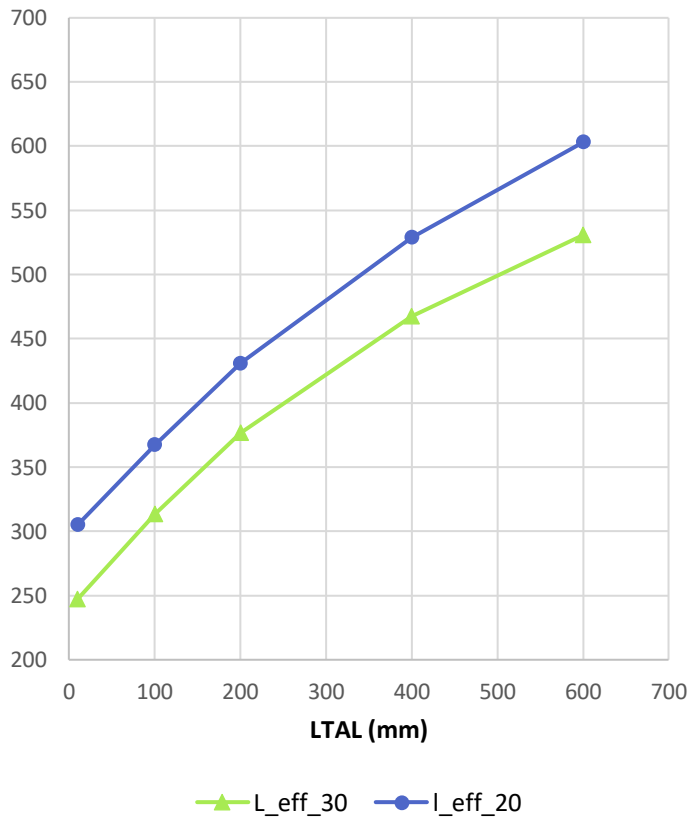
Résultats pour $\alpha = 20^\circ$ et 30°

Angle de l'arbalétrier	ALPHA	20 / 30
Hauteur de l'entrait	HE	300
Hauteur de l'arbalétrier	HA	200
Nombre d'entailles	NGR	10
Angle de progression des entailles	BETA	10
Matériau	MTB	Épicéa
Conditions appui	VAR_APPUI	1
Frottement		NON

LTAL	10	100	200	400	600
l_cis	371	461	561	761	961
l_eff	305	367	431	529	603

LTAL	10	100	200	400	600
l_cis	296	386	486	686	886
l_eff	247	313	377	467	531

l_eff (mm) en fonction de LTAL (mm)



5 Conclusion

Les assemblages par entailles profondes relèvent d'un principe mécanique simple qui est celui du contact. Ce sont donc des assemblages très anciens et qui sont utilisés depuis des siècles. Cette transmission ancestrale a fait qu'il ne s'est jamais vraiment avéré nécessaire de les dimensionner car leur dimensionnement suivait les dimensions des pièces et peu de problèmes de structure ont pâti de cette approche. Le progrès des machines d'usinage au cours de ces dernières décennies a conduit à une petite révolution en permettant une production ultra précise et donc à multiplier les surfaces de contacts. Dans cette nouvelle situation technique, les efforts pouvant être transmis sont alors beaucoup plus importants et peuvent conduire à des ruptures fragiles qu'il devient aussi nécessaire d'évaluer. Etant donné les capacités mécaniques des bois feuillus, cette approche d'assemblage a semblé très prometteuse à explorer dans ce projet. Les premiers essais d'assemblages réalisés à différents angles ont montré que les modes de rupture envisagés étaient tous bien possibles. Ces essais ont été réalisés sur du bois résineux pour des questions de capacité et par souci d'économie du bois feuillu à notre disposition. Au regard de ces essais, il est apparu que ce qui était le plus pertinent à modéliser était les ruptures par cisaillement du talon. En effet la maîtrise de longueur apparente cisailée est très mal abordée dans la littérature. Alors qu'il était prévu d'orienter plutôt la modélisation sur l'aspect plasticité, l'aspect modélisation a été réorienté sur de la modélisation de rupture fragile.

L'aspect modélisation rupture plastique a cependant été conduite, le paramétrage des maillages a été réalisé en prouvant que cela était tout à fait envisageable d'un point de vue approche de modélisation étant donné l'ensemble mécanique à représenter. Cependant, le calage des paramètres du modèle pour son utilisation n'a pas été réalisé. En effet, pour fixer les paramètres de l'approche non linéaire des assemblages, il était prévu de modéliser le comportement élémentaire d'éprouvettes de différentes essences de bois feuillus en compression en faisant varier le sens du fil par rapport à l'effort. La campagne d'essais de compression a été entièrement réalisée et les modèles éléments finis des éprouvettes également développés. Les résultats expérimentaux sont apparus très satisfaisant pour réaliser le calage. Il est cependant à noter qu'un soin plus important aurait dû être porté pour avoir des éprouvettes avec des masses volumiques variant de manière plus continue au sein des échantillonnages. Ceci aurait permis d'avoir une approche complètement irréprochable scientifiquement, mais n'aurait pas apporté grand-chose pour le calage car les comportements mécaniques ont été parfaitement identifiés. Le travail s'est arrêté ici car dans le temps imparti et dans le contexte de cette fin de projet, il a été préféré de porter les efforts sur le développement d'une approche non-linéaire pour investiguer les ruptures fragiles. Le travail n'est donc pas vain, les travaux sont dans la bonne direction, ils peuvent être repris au stade arrêté et terminés.

L'effort s'est donc porté en cette fin de projet sur l'aspect modélisation fragile de ces assemblages en introduisant le caractère adoucissant du cisaillement. Un modèle paramétrique a été développé, il a été confronté aux premiers résultats expérimentaux et s'est montré tout à fait performant. Les travaux d'exploitation des résultats numériques ont été réalisés afin de tirer du modèle deux choses essentielles pour le dimensionnement.

- En premier, il peut être extrait du modèle les distances qui permettent de représenter ces assemblages sous forme filaires pour les ingénieurs en bureau d'études. Ainsi, les calculs de structures peuvent être beaucoup plus proches de la réalité pour approcher les efforts qui transitent dans ces assemblages. Le modèle qui est paramétriques peut tourner en boucles en faisant varier les paramètres mécaniques et géométriques. Les excentricités peuvent être alors formulées sous formes de fonction des paramètres essentiels.
- La longueur cisailée, donnée essentielle du modèle de rupture simple utilisé par les ingénieurs, peut être déterminée au seuil de rupture détecté par le modèle MEF. De manière identique au point précédent, ce paramètre de calcul peut être obtenu sous la forme d'une fonction des paramètres essentiels caractérisant ces assemblages. Il suffit de faire tourner en boucle le programme en faisant varier les paramètres sur des plages réalistes et de faire une analyse des résultats pour proposer les fonctions les mieux adaptées.

Avant de pouvoir exploiter le modèle tel qu'il est décrit précédemment, il est nécessaire de réaliser une campagne d'essais sur les assemblages feuillus afin de finaliser son calage sur les bois feuillus. Bien que tout ait été réuni pour pouvoir le faire, la décision fâcheuse de l'Université de Lorraine et de l'ENSTIB d'interdire l'utilisation de la dalle d'essais du LERMAB à la fin de l'année 2021 a contraint l'équipe de recherche à renoncer à le faire.

En cette fin de projet, les éléments attendus de dimensionnement des assemblages par entailles profondes ne peuvent donc être fournis cependant le chemin est tracé pour y parvenir.