

Manuel de Référence
Fascicule R4.01 : Matériaux composites
Document : R4.01.02

Elasticité anisotrope

Résumé

Ce document traite de l'élasticité anisotrope.

Table des matières

1 Introduction	3
2 Topologie des matrices de Hooke	3
2.1 L'Orthotropie	3
2.2 Isotropie transverse	4
2.3 Isotropie	4
3 Matrice de Hooke et de souplesse	4
3.1 Notations.....	4
3.2 Cas 3 D.....	6
3.2.1 Orthotropie	6
3.2.1.1 Matrice de souplesse	6
3.2.1.2 Matrice de Hooke	6
3.2.2 Isotropie transverse	7
3.2.2.1 Matrice de souplesse	7
3.2.2.2 Matrice de Hooke	9
3.2.3 Isotropie	10
3.2.3.1 Matrice de souplesse en fonction de E et ν	10
3.2.3.2 Matrice de Hooke en fonction de E et ν	10
3.2.3.3 Matrice de souplesse en fonction des coefficients de Lamé λ et μ	11
3.2.3.4 Matrice de Hooke en fonction des coefficients de Lamé λ et μ	11
3.3 Cas 2 D orthotrope en déformations planes et axisymétrique	11
3.3.1 Matrice de souplesse.....	11
3.3.2 Matrice de Hooke	12
3.4 Cas 2 D orthotrope en contraintes planes	12
3.4.1 Matrice de souplesse.....	12
3.4.2 Matrice de Hooke	12
4 Utilisation dans <i>Code_Aster</i>	13
5 Bibliographie	14

1 Introduction

L'objectif de ce document est de donner l'expression des matrices de souplesse et de Hooke pour des matériaux élastiques orthotrope, isotrope transverse et isotrope dans les cas 3Dn 2D-contraintes, 2D-déformations planes et axisymétrie.

Nous parlons de « matrices » de Hooke car, par souci de simplification, nous n'avons pas adopté la notation d'un tenseur d'ordre 4.

En toute rigueur, pour les matériaux élastiques linéaires, les contraintes sont des fonctions linéaires des déformations.

On écrit : $\sigma_{ij} = H_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl}$

La nature symétrique de $[\sigma]$ et $[\varepsilon]$ et l'adoption pour ces tenseurs d'ordre 2 d'une forme vectorielle permet d'écrire :

$$\{\sigma\} = [H]\{\varepsilon\}$$

ou $\{\sigma\}$ et $\{\varepsilon\}$ sont la représentation vectorielle des tenseurs d'ordre 2 $\{\sigma\}$ et $[\varepsilon]$ et où $[H]$ est une matrice 6 x 6.

2 Topologie des matrices de Hooke

2.1 L'Orthotropie

On peut montrer la symétrie de la matrice de Hooke H .

Nous avons donc vingt et une composantes indépendantes dans le cas 3D.

$$[H] = \begin{matrix} & \begin{matrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & H_{14} & H_{15} & H_{16} \\ & H_{22} & H_{23} & H_{24} & H_{25} & H_{26} \\ & & H_{33} & H_{34} & H_{35} & H_{36} \\ SYM & & & H_{44} & H_{45} & H_{46} \\ & & & & H_{55} & H_{56} \\ & & & & & H_{66} \end{matrix} \end{matrix}$$

Un matériau orthotrope possède deux plans orthogonaux de symétrie élastique.

Ceci veut dire que si l'on appelle $[H']$ la matrice $[H]$ après symétrie(s)
 $[H'] = [H]$.

Les relations obtenues entre les coefficients permettent d'écrire que $[H]$ est définie par neuf composantes indépendantes.

Dans les axes d'orthotropie :

$$[H] = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & H_{22} & H_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & H_{33} & 0 & 0 & 0 \\ \text{SYM} & & & H_{44} & 0 & 0 \\ & & & & H_{55} & 0 \\ & & & & & H_{66} \end{bmatrix}$$

Il faut donc fournir 9 coefficients.

2.2 Isotropie transverse

L'isotropie transverse est une restriction de l'orthotropie dans où l'on a l'isotropie dans l'un des deux plans orthogonaux de symétrie élastique.

La matrice [H] aura la même forme que pour l'orthotropie mais avec des relations supplémentaires entre les composantes.
5 composantes suffisent à déterminer [H].

2.3 Isotropie

Le matériau est isotrope si [H] reste invariant dans tout changement de repère.

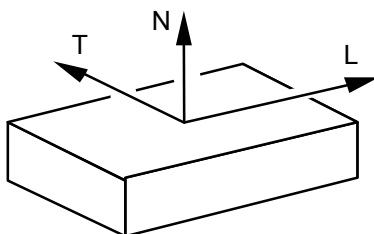
Deux coefficients suffisent à déterminer [H].

3 Matrice de Hooke et de souplesse

3.1 Notations

Au lieu d'utiliser les indices 1, 2 et 3 pour repérer les axes, on va utiliser les indices correspondants L, T et N :

L pour longitudinal
T pour transversal
N pour normal



Les coefficients qui interviennent sont les suivants :

E_L : Module d'Young longitudinal
 E_T : Module d'Young transversal
 E_N : Module d'Young normal
 G_{LT} : Module de cisaillement dans le plan (L, T)
 G_{TN} : Module de cisaillement dans le plan (T, N)
 G_{LN} : Module de cisaillement dans le plan (L, N)
 ν_{LT} : Coefficient de Poisson dans le plan (L, T)
 ν_{TN} : Coefficient de Poisson dans le plan (T, N)
 ν_{LN} : Coefficient de Poisson dans le plan (L, N)

Remarque très importante :

ν_{LT} est différent de ν_{TL} :
 Si l'on applique une traction suivant L

$$\varepsilon_{LL} = \frac{\sigma_{LL}}{E_L} \text{ (loi de Hooke suivant une direction).}$$

Cette traction est accompagnée, proportionnellement, d'une contraction suivant T, $-\nu_{LT} \frac{\sigma_{LL}}{E_L}$

et d'une contraction suivant N, $-\nu_{LN} \frac{\sigma_{LL}}{E_L}$.

Le premier indice indique l'axe où s'exerce l'effet du chargement et le second indice indique la direction du chargement.

Ensuite on exerce une traction suivant T, puis une traction suivant N ; on obtient :

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{LL} &= \frac{\sigma_{LL}}{E_L} - \nu_{LT} \frac{\sigma_{TT}}{E_T} - \nu_{LN} \frac{\sigma_{NN}}{E_N} \\ \varepsilon_{TT} &= -\nu_{TL} \frac{\sigma_{LL}}{E_L} + \frac{\sigma_{TT}}{E_T} - \nu_{TN} \frac{\sigma_{NN}}{E_N} \\ \varepsilon_{NN} &= -\nu_{NL} \frac{\sigma_{LL}}{E_L} - \nu_{NT} \frac{\sigma_{TT}}{E_T} + \frac{\sigma_{NN}}{E_N} \end{aligned} \right\} (S)$$

La matrice de souplesse $[H]^{-1}$ est symétrique ; on en déduit :

$$\frac{\nu_{LT}}{E_L} = \frac{\nu_{TL}}{E_T}$$

$$\frac{\nu_{LN}}{E_L} = \frac{\nu_{NL}}{E_N}$$

$$\frac{\nu_{TN}}{E_T} = \frac{\nu_{NT}}{E_N}$$

Dans tout ce qui suit ν sera noté ν .

3.2 Cas 3 D

3.2.1 Orthotropie

3.2.1.1 Matrice de souplesse

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{LL} \\ \varepsilon_{TT} \\ \varepsilon_{NN} \\ \varepsilon_{LT} \\ \varepsilon_{LN} \\ \varepsilon_{TN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{LN}}{E_N} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{TL}}{E_L} & \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{TN}}{E_N} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{NL}}{E_L} & -\frac{\nu_{NT}}{E_T} & \frac{1}{E_N} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LN}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TN}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{LL} \\ \sigma_{TT} \\ \sigma_{NN} \\ \sigma_{LT} \\ \sigma_{LN} \\ \sigma_{TN} \end{bmatrix}$$

SYM

H⁻¹ – Orthotropie

3.2.1.2 Matrice de Hooke

$$\begin{bmatrix} \sigma_{LL} \\ \sigma_{TT} \\ \sigma_{NN} \\ \sigma_{LT} \\ \sigma_{LN} \\ \sigma_{TN} \end{bmatrix} = \frac{E_L E_T E_N}{\Delta} \begin{bmatrix} (1 - \nu_{TN} \nu_{NT}) & (\nu_{LT} + \nu_{LN} \nu_{NT}) & (\nu_{LN} + \nu_{LT} \nu_{TN}) & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E_T E_N}{(\nu_{TL} + \nu_{TN} \nu_{NL})} & \frac{E_T E_N}{(1 - \nu_{NL} \nu_{LN})} & \frac{E_T E_N}{(\nu_{TN} + \nu_{LN} \nu_{TL})} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E_L E_N}{(\nu_{NL} + \nu_{NT} \nu_{TL})} & \frac{E_L E_N}{(\nu_{NT} + \nu_{LT} \nu_{NL})} & \frac{E_L E_N}{(1 - \nu_{LT} \nu_{TL})} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & GLT & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & GLN & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & GTN \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{LL} \\ \varepsilon_{TT} \\ \varepsilon_{NN} \\ \varepsilon_{LT} \\ \varepsilon_{LN} \\ \varepsilon_{TN} \end{bmatrix}$$

SYM

* Δ

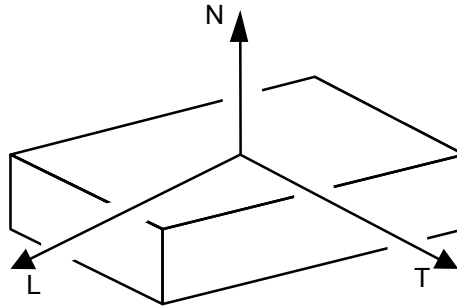
* Δ

* Δ

H – Orthotropie avec $\frac{\nu_{TL}}{E_L} = \frac{\nu_{LT}}{E_T}$; $\frac{\nu_{NL}}{E_L} = \frac{\nu_{LN}}{E_N}$; $\frac{\nu_{NT}}{E_T} = \frac{\nu_{TN}}{E_N}$

3.2.2 Isotropie transverse

3.2.2.1 Matrice de souplesse



La matrice H^{-1} peut être déduite directement de la matrice H^{-1} -Orthotropie en utilisant les propriétés de l'isotropie transverse.

Dans le plan (L, T) :

$$E_L = E_T$$

$$\nu_{TL} = \nu_{LT}$$

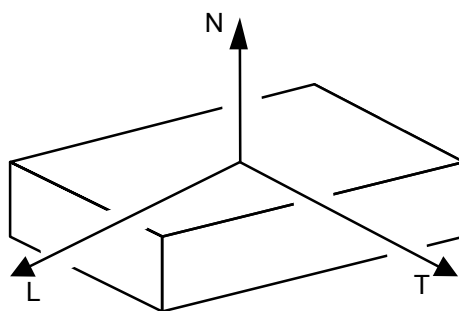
$$G_{LT} = \frac{E_L}{2(1 + \nu_{LT})}$$

Dans les plans (L, N) et (T, N) :

$$\nu_{NT} = \nu_{NL}$$

$$\nu_{LN} = \nu_{TN}$$

$$G_{TN} = G_{LN}$$



$$E_L = E_T$$

$$\nu_{LT} = \nu_{TL}$$

$$G_{LT} = \frac{E_L}{2(1 + \nu_{LT})}$$

$$\nu_{NT} = \nu_{NL}$$

$$\nu_{LN} = \nu_{TN}$$

$$G_{TN} = G_{LN}$$

$$\frac{\nu_{NT}}{E_L} = \frac{\nu_{LN}}{E_N}$$

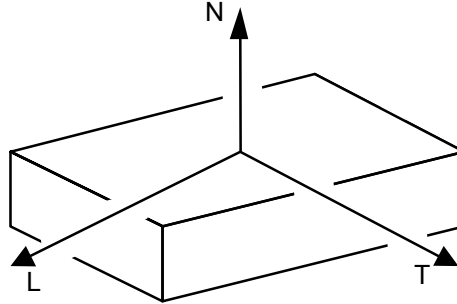
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{LL} \\ \varepsilon_{TT} \\ \varepsilon_{NN} \\ \varepsilon_{LT} \\ \varepsilon_{LN} \\ \varepsilon_{TN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & \frac{-\nu_{LT}}{E_L} & \frac{-\nu_{LN}}{E_N} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{TL}}{E_L} & \frac{1}{E_L} & \frac{-\nu_{LN}}{E_N} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{NL}}{E_L} & \frac{-\nu_{NT}}{E_L} & \frac{1}{E_N} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{2(1 + \nu_{LT})}{E_L} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1}{G_{LN}} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{G_{TN}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{LL} \\ \sigma_{TT} \\ \sigma_{NN} \\ \sigma_{LT} \\ \sigma_{LN} \\ \sigma_{TN} \end{bmatrix}$$

SYM

H⁻¹ - Isotropie transverse

3.2.2.2 Matrice de Hooke

La matrice [H] possède les mêmes symétries que $[H]^{-1}$



$$\begin{bmatrix} \sigma_{LL} \\ \sigma_{TT} \\ \sigma_{NN} \\ \sigma_{LT} \\ \sigma_{LN} \\ \sigma_{TN} \end{bmatrix} = \frac{E_L^2 \cdot E_N}{\begin{bmatrix} 1 - 2\nu_{NL} \cdot \nu_{LN} \\ -\nu_{LT}^2 \\ -2\nu_{NL} \nu_{LN} \nu_{LT} \end{bmatrix}} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \frac{1 - \nu_{NL} \cdot \nu_{LN}}{E_L \cdot E_N} & \frac{\nu_{LT} + \nu_{NL} \nu_{LN}}{E_L \cdot E_N} & \frac{\nu_{LN} + \nu_{LT} \nu_{LN}}{E_L \cdot E_N} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{TL} + \nu_{NL} \nu_{LN}}{E_L \cdot E_N} & \frac{1 - \nu_{NL} \cdot \nu_{LN}}{E_L \cdot E_N} & \frac{\nu_{LN} + \nu_{LT} \nu_{LN}}{E_L \cdot E_N} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{NL} + \nu_{LT} \cdot \nu_{NL}}{E_L^2} & \frac{\nu_{NL} + \nu_{LT} \cdot \nu_{NL}}{E_L^2} & \frac{1 - \nu_{LT}^2}{E_L^2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E_L \cdot \Delta'}{2(1 + \nu_{LT})} & G_{LN} \cdot \Delta' & G_{LN} \cdot \Delta' & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{LL} \\ \varepsilon_{TT} \\ \varepsilon_{NN} \\ \varepsilon_{LT} \\ \varepsilon_{LN} \\ \varepsilon_{TN} \end{bmatrix}$$

H – Isotropie transversale

3.2.3 Isotropie

3.2.3.1 Matrice de souplesse en fonction de E et ν

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{LL} \\ \varepsilon_{TT} \\ \varepsilon_{NN} \\ \varepsilon_{LT} \\ \varepsilon_{LN} \\ \varepsilon_{TN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{G} = \frac{2(1+\nu)}{E} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1}{G} = \frac{2(1+\nu)}{E} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{G} = \frac{2(1+\nu)}{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{LL} \\ \sigma_{TT} \\ \sigma_{NN} \\ \sigma_{LT} \\ \sigma_{LN} \\ \sigma_{TN} \end{bmatrix}$$

SYM

H^{-1} – Isotropie complète

3.2.3.2 Matrice de Hooke en fonction de E et ν

$$\begin{bmatrix} \sigma_{LL} \\ \sigma_{TT} \\ \sigma_{NN} \\ \sigma_{LT} \\ \sigma_{LN} \\ \sigma_{TN} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{LL} \\ \varepsilon_{TT} \\ \varepsilon_{NN} \\ \varepsilon_{LT} \\ \varepsilon_{LN} \\ \varepsilon_{TN} \end{bmatrix}$$

SYM

H – Isotropie complète

3.2.3.3 Matrice de souplesse en fonction des coefficients de Lamé λ et μ

La loi de Hooke prend la forme suivante avec les coefficients de Lamé λ et μ .

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}$$

En utilisant le système d'équations (S), on obtient :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{LL} \\ \sigma_{TT} \\ \sigma_{NN} \\ \sigma_{LT} \end{bmatrix} = \frac{1}{1 - \nu_{LT} \cdot \nu_{TL}} \begin{bmatrix} E_L & \nu_{TL} \cdot E_T & 0 & 0 \\ \nu_{LT} \cdot E_L & E_T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{LT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{LL} \\ \varepsilon_{TT} \\ \varepsilon_{NN} \\ \varepsilon_{LT} \end{bmatrix}$$

H – Orthotropie plane en contraintes planes

3.2.3.4 Matrice de Hooke en fonction des coefficients de Lamé λ et μ

$$\begin{bmatrix} \sigma_{LL} \\ \sigma_{TT} \\ \sigma_{NN} \\ \sigma_{LN} \\ \sigma_{LT} \\ \sigma_{TN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ & & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ & & & SYM & \mu & 0 \\ & & & & \mu & 0 \\ & & & & & \mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{LL} \\ \varepsilon_{TT} \\ \varepsilon_{NN} \\ \varepsilon_{LN} \\ \varepsilon_{LT} \\ \varepsilon_{TN} \end{bmatrix}$$

H – Isotropie complète avec les coefficients de Lamé

3.3 Cas 2 D orthotrope en déformations planes et axisymétrique

3.3.1 Matrice de souplesse

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{LL} \\ \varepsilon_{TT} \\ 0 \\ \varepsilon_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} (1 - \nu_{NL} \cdot \nu_{LN}) & -\frac{1}{E_L} (\nu_{TL} + \nu_{TN} \cdot \nu_{NL}) & 0 & 0 \\ -\frac{1}{E_T} (\nu_{LT} + \nu_{LN} \cdot \nu_{NT}) & \frac{1}{E_T} (1 - \nu_{TN} \cdot \nu_{NT}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{LL} \\ \sigma_{TT} \\ \sigma_{NN} \\ \sigma_{LT} \end{bmatrix}$$

H⁻¹ – Orthotropie plane en déformations planes et axisymétrie

3.3.2 Matrice de Hooke

$$\begin{bmatrix} \sigma_{LL} \\ \sigma_{TT} \\ \sigma_{NN} \\ \sigma_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_L}{\Delta'}(1 - \nu_{TN} \cdot \nu_{NT}) & \frac{E\Delta}{\Delta'}(\nu_{LT} + \nu_{LN} \cdot \nu_{NT}) & \frac{E_N}{\Delta'}(\nu_{NL} + \nu_{NT} + \nu_{TL}) & 0 \\ \frac{E_T}{\Delta'}(\nu_{TL} + \nu_{TN} + \nu_{NL}) & \frac{E_T}{\Delta'}(1 - \nu_{NL} \cdot \nu_{LN}) & \frac{E_T}{\Delta'}(1 - \nu_{NT} + \nu_{LT} + \nu_{NL}) & 0 \\ \frac{E_N}{\Delta'}(\nu_{NL} + \nu_{NT} \cdot \nu_{TL}) & \frac{E_N}{\Delta'}(\nu_{NT} + \nu_{LT} + \nu_{NL}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{LT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{LL} \\ \varepsilon_{TT} \\ 0 \\ \varepsilon_{LT} \end{bmatrix}$$

$$\Delta' = 1 - \nu_{TN} \cdot \nu_{NT} - \nu_{NL} \cdot \nu_{LN} - \nu_{LT} \cdot \nu_{TL} - 2\nu_{TN} \nu_{NL} \nu_{LT}$$

H – Orthotropie plane en déformations planes et axisymétrie

3.4 Cas 2 D orthotrope en contraintes planes

3.4.1 Matrice de souplesse

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{LL} \\ \varepsilon_{TT} \\ \varepsilon_{NN} \\ \varepsilon_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{LT}}{E_T} & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{TL}}{E_L} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{LL} \\ \sigma_{TT} \\ \sigma_{NN} \\ \sigma_{LT} \end{bmatrix}$$

H⁻¹ – Orthotropie plane en contraintes planes

3.4.2 Matrice de Hooke

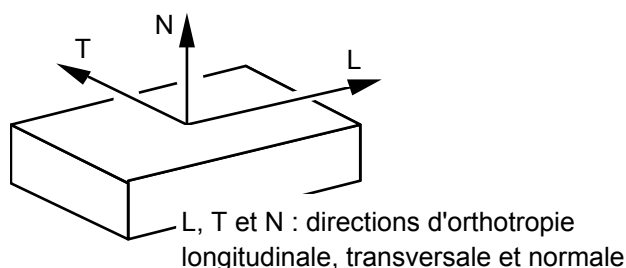
$$\begin{bmatrix} \sigma_{LL} \\ \sigma_{TT} \\ 0 \\ \sigma_{LT} \end{bmatrix} = \frac{1}{1 - \nu_{LT} \cdot \nu_{TL}} \begin{bmatrix} E_L & \nu_{TL} E_T & 0 & 0 \\ \nu_{LT} E_L & E_T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{LT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{LL} \\ \varepsilon_{TT} \\ \varepsilon_{NN} \\ \varepsilon_{LT} \end{bmatrix}$$

H – Orthotropie en contraintes planes

4 Utilisation dans Code_Aster

Dans Aster, la définition des caractéristiques élastiques orthotropes constantes ou fonctions de la température s'effectuent par la commande `DEFI_MATERIAU`, mot-clé `ELAS_ORTH` ou `ELAS_ORTH_FO` pour les éléments de coque et les éléments massifs isoparamétriques ou les couches constitutives d'un composite (voir la commande `DEFI_COQU_MULT`).

Pour définir le repère d'orthotropie (L, T, N) lié aux éléments, on peut se reporter aux documentations [U4.42.03] `DEFI_COQU_MULT` et [U4.42.01] `AFFE_CARA_ELEM`.



```
/ ELAS_ORTH = _F (
    ♦ E_L = ygl  Module d'Young longitudinal.
    ♦ E_T = ygt  Module d'Young transversal.
    ♦ E_N = ygn  Module d'Young normal.
    ♦ GL_T = glt  Module de cisaillement dans le plan LT.
    ♦ G_TN = gtn  Module de cisaillement dans le plan TN.
    ♦ G_LN = gln  Module de cisaillement dans le plan LN.
    ♦ NU_LT = nult Coefficient de Poisson dans le plan LT.
    ♦ NU_TN = nutn Coefficient de Poisson dans le plan TN.
    ♦ NU_LN = nuln Coefficient de Poisson dans le plan LN.
```

Remarque importante :

L'exposé de cette note de référence est basé sur la convention des livres de J.L.Batoz et D.Gay. La documentation U de `DEFI_MATERIAU` décrit ces choix, et le coefficient `NU_LT` s'interprète de la façon suivante dans Aster :

si l'on exerce une traction selon l'axe L donnant lieu à une déformation selon cet axe égale à

$$\varepsilon_L = \frac{\sigma_L}{ygl}, \text{ on a une déformation selon l'axe T égale à : } \varepsilon_T = -nult * \frac{\sigma_L}{ygl}.$$

5 Bibliographie

- [1] J.C. MASSON : Matrice de Hooke pour les matériaux orthotropes, Rapport interne Applications en Mécanique, n°79-018, CiSi, 1979.
- [2] D. GAY : Matériaux composites, Edition Hermes, 1987
- [3] J.L. BATOZ, G. DHATT : Modélisation des stuctures par éléments finis, Volume 1, Edition Hermes