

**Manuel d'Utilisation**  
**Fascicule U4.5- : Méthodes de résolution**  
**Document : U4.54.02**

## Opérateur THER\_NON\_LINE

### 1 But

Calculer la réponse thermique avec des non linéarités de comportements et de conditions aux limites.

L'équation de la chaleur est résolue en régime évolutif (sauf si aucune liste d'instant n'est fournie, seul le régime stationnaire est alors calculé). Les non linéarités proviennent soit du comportement (caractéristiques du matériau dépendant de la température), soit des conditions aux limites (rayonnement en milieu infini, flux non linéaire). Une formulation en enthalpie a été choisie afin de prendre en compte plus facilement les changements de phase du matériau.

Le calcul évolutif peut être initialisé, au premier instant de trois manières différentes (mot clé TEMP\_INIT) :

- par une température constante,
- par un champ de température, défini au préalable, ou extrait d'un calcul précédent,
- par un calcul stationnaire.

Cet opérateur permet aussi de résoudre les problèmes de séchage (non linéaire) en résolvant l'équation de la chaleur où la concentration en eau  $C$  est assimilée à une température, pour la résolution. La conductivité thermique est dans ce cas le coefficient de diffusion, non linéaire en  $C$  et fonction, éventuellement, d'une température calculée au préalable.

Pour modéliser l'hydratation du béton, l'opérateur permet également d'ajouter un terme source fonction de la variable d'hydratation à l'équation de la chaleur. Ce terme est alors donné par une équation d'évolution où la température intervient.

Le concept produit par l'opérateur THER\_NON\_LINE est de type `evol_ther` comme pour une analyse linéaire par THER\_LINEAIRE [U4.54.01].

Quand un calcul de sensibilité du résultat par rapport à un paramètre est demandé, il y a production d'autant de structures de données de type `evol_ther` que de paramètres requis.

## 2 Syntaxe

```
temper [evol_ther] = THER_NON_LINE

(  ◇  reuse =      temper,

    ◆  MODELE      =      mo,                      [modele]

    ◆  CHAM_MATER  =      chmat,                    [cham_mater]

    ◆  EXCIT  =_F (
                                ◆  CHARGE      =      char,          [charge]
                                ◇  FONC_MULT  =      fonc,          [fonction]
                                ),

    ◇  TEMP_INIT  =_F(
                                ◇  /  STATIONNAIRE =  'OUI',          [DEFAULT]
                                /  VALE         =  tinit,          [R]
                                /  CHAM_NO      =  tinit,          [cham_no_TEMP_R]
                                /  EVOL_THER    =  temp,          [evol_ther]
                                NUME_INIT      =  nuinievol,      [I]
                                ),

    ◇  SENSIBILITE  =_F(
                                . . . voir [U4.50.02] . . .
                                ),

    ◇  INCREMENT  =_F(
                                ◆  LIST_INST  =      litps,          [listr8]
                                ◇  NUME_INIT  =      /  0,
                                /  nuini,          [I]
                                ◇  NUME_FIN   =      nufin,          [I]
                                ),

    ◇  COMP_THER_NL  =_F(
                                ◆  RELATION  =      /  'THER_NL',      [DEFAULT]
                                /  'THER_HYDR',  [txm]
                                /  'SECH_GRANGER', [txm]
                                /  'SECH_MENSI',  [txm]
                                /  'SECH_BAZANT', [txm]
                                /  'SECH_NAPPE',  [txm]
                                ◇  /  TOUT     =      'OUI',          [txm]
                                /  |  GROUP_MA =  l_grmail,          [l_gr_ma]
                                |  MAILLE     =  l_maille,          [l_ma]
                                ),

    ◇  EVOL_THER_SECH  =      resuther,              [evol_ther]
```

Titre :           Opérateur *THER\_NON\_LINE*  
Auteur(s) :    **C. DURAND**

Date :        23/06/05  
Clé :    U4.54.02-G1 Page :    3/12

```

    ◇ NEWTON =_F(
                                ◇ REAC_ITER =        /0,               [DEFAULT]
                                /it,                [I]
                                ◇ RESI_LINE_RELA=     /1.E-3,        [DEFAULT]
                                /reslin,           [R]
                                ◇ ITER_LINE_MAXI=     /0,               [DEFAULT]
                                /iter1,           [R]
                                ),
    ◇ CONVERGENCE=_F (
                                ◇ RESI_GLOB_RELA=     /1.E-6,        [DEFAULT]
                                /testr,           [R]
                                ◇ RESI_GLOB_MAXI=     /test1,        [R]
                                ◇ ITER_GLOB_MAXI=     /10,           [DEFAULT]
                                /iter1,           [R]
                                ),
    ◇ PARM_THETA =            /    theta,                [R]
                             /    0.57,                [DEFAULT]
    ◇ SOLVEUR    =_F ([U4.50.01])
    ◇ ARCHIVAGE    =_F (    /    ◇ LIST_ARCH =   l_arch ,    [listis]
                             /    ◇ PAS_ARCH   =   ipas    ,    [I]
                             /    ◇ LIST_INST   =   l_inst ,    [listr8]
                             /    ◇ INST        =   inst    ,    [R]
                             ◇ PRECISION   =   / 10.-3,        [DEFAULT]
                             / prec        [R]
                             ◇ CRITERE       =   / 'RELATIF',   [DEFAULT]
                             / 'ABSOLU',        [R]
                             ◇ CHAM_EXCLU=   l_cham ,        [l_Kn]
                             ),
    ◇ OPTION   =            |    'FLUX_ELGA_TEMP',        [l_Kn]
                             |    'FLUX_ELNO_TEMP',
    ◇ TITRE   =            titre,                [l_Kn]

);

```

## 3 Opérandes

### 3.1 Opérande **MODELE**

- ◆ **MODELE** = mo

Nom du modèle dont les éléments font l'objet du calcul thermique.

### 3.2 Opérande **CHAM\_MATER**

- ◆ **CHAM\_MATER** = chmat

Nom du champ de matériau affecté sur le modèle.

### 3.3 Mot clé **EXCIT**

- ◆ **EXCIT** =

Mot clé facteur permettant de définir plusieurs chargements. Pour chaque occurrence du mot clé facteur, on définit une charge éventuellement multipliée par une fonction du temps.

#### 3.3.1 Opérande **CHARGE**

- ◆ **CHARGE** = char

Concept de type charge produit par **AFFE\_CHAR\_THER** ou par **AFFE\_CHAR\_THER\_F** [U4.44.02].

**Remarque importante :**

*Pour chaque occurrence du mot clé facteur **EXCIT** les différents concepts **char** utilisés doivent être construits sur le même modèle **mo**.*

#### 3.3.2 Opérande **FONC\_MULT**

- ◇ **FONC\_MULT** = fonc

Coefficient multiplicatif fonction du temps (concept de type fonction) appliqué à la charge.

**Remarque importante :**

*L'utilisation concomitante de **FONC\_MULT** avec une charge contenant des chargements thermiques dépendant de la température est interdite ; c'est-à-dire pour des chargements de type **ECHANGE**, **RAYONNEMENT** ou **FLUNL**.*

### 3.4 Mot clé **TEMP\_INIT**

- ◇ **TEMP\_INIT** = litps

Permet de définir le champ initial à partir duquel le calcul évolutif est effectué. Le champ initial est affecté du numéro d'ordre 0 et l'instant initial prend comme valeur le premier réel de la liste d'instant litps.

**Remarque :**

*Si le mot clé **TEMP\_INIT** est absent, on effectue uniquement le calcul stationnaire à l'instant défini sous le mot clé **INCREMENT**.*

## 3.4.1 Opérande STATIONNAIRE

/ STATIONNAIRE = 'OUI'

La valeur initiale est alors le résultat d'un calcul stationnaire préalable. Ce calcul prend en compte les conditions aux limites définies sous le mot clé CHARGE.

## 3.4.2 Opérande VALE

/ VALE = tinit

La valeur initiale de température est prise constante sur toute la structure.

## 3.4.3 Opérande CHAM\_NO

/ CHAM\_NO = tinit

La valeur initiale est définie par un `cham_no_TEMP_R` (résultat des opérateurs `AFFE_CHAM_NO` [U4.44.11] ou `RECU_CHAMP` [U4.71.01]).

## 3.4.4 Opérande EVOL\_THER

/ ♦ EVOL\_THER = temp

La valeur initiale est extraite d'une structure de données de type `evol_ther`.

## 3.4.5 Opérande NUME\_INIT

♦ NUME\_INIT = nuini\_evol

Numéro d'ordre du champ à extraire de cette structure de donnée.

Le champ initial est stocké dans la structure de données résultat `temper` sous le numéro d'ordre 0.

### Remarque :

*Attention, il s'agit du numéro d'ordre dans la structure de donnée lue en reprise par le mot clé EVOL\_THER précédent. Si cette structure de donnée a été calculée avec une liste d'instants différente de celle utilisée sous le mot clé facteur INCREMENT de la résolution courante, il est impératif de renseigner NUME\_INIT sous INCREMENT, la même valeur de numéro d'ordre correspondant à des instants physiques différents. Dans le cas où les deux listes d'instants sont identiques, on peut se dispenser de renseigner deux fois le même NUME\_INIT, sous ETAT\_INIT et sous INCREMENT.*

## 3.5 Mot clé SENSIBILITE

◇ SENSIBILITE = liste de paramètres sensibles

Active le calcul de la dérivée du champ de température par rapport à un paramètre sensible du problème.

Le document [U4.50.01] précise le fonctionnement du mot-clé.

## 3.6 Mot clé INCREMENT

◇ INCREMENT =

Permet de définir les instants de calcul qui déterminent les intervalles de temps pris pour intégrer l'équation différentielle.

### Remarque :

*Si le mot clé INCREMENT est absent, on crée une liste d'instants réduite au seul réel 0. et on effectue un calcul stationnaire.*



/   'THER\_HYDR '

Résolution de l'équation de la chaleur avec un terme source supplémentaire :  $Q\dot{\xi}$

$Q$  est la chaleur d'hydratation, supposée constante. La variable d'hydratation  $\xi$  est solution de la loi d'évolution non linéaire, résolue simultanément au problème de thermique :

$$\dot{\xi} = A(\xi)e^{-E/RT}$$

On se reportera à la documentation de l'opérateur `DEFI_MATERIAU` pour la signification des différents paramètres.

Modélisations supportées :

- milieux continus 3D : 3D
- milieux continus 2D : 2D, AXIS

/   'SECH\_GRANGER '

Résolution du séchage caractérisé par l'équation  $\frac{\partial C}{\partial t} - \text{Div}[D(C, T)\nabla C] = 0$

C'est l'équation de la chaleur non linéaire où la variable de séchage  $C$  tient le rôle de la température. Le choix de la relation de comportement permet de définir le coefficient de diffusion  $D(C, T)$  selon diverses formes usuelles de la littérature. La formulation de Granger du coefficient de diffusion est donnée par l'expression :

$$D(C, T) = A \exp(BC) \frac{T}{T_0} \exp\left[-\frac{Q_s}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right]$$

On se reportera à la documentation de l'opérateur `DEFI_MATERIAU` pour la signification des différents paramètres. Dans le cas de l'utilisation de cette loi `SECH_GRANGER`, il est nécessaire de s'assurer de la cohérence entre le matériau utilisé et la loi de comportement : c'est à dire que le mot clé `SECH_GRANGER` a bien été renseigné dans `DEFI_MATERIAU` pour le matériau utilisé.

Modélisations supportées :

- milieux continus 3D : 3D
- milieux continus 2D : 2D, AXIS

Comme la résolution du séchage est effectuée par un opérateur de thermique, les modélisations supportées sont des modélisations thermiques, mais qui n'ont alors qu'une valeur conceptuelle d'ordre géométrique.

/   'SECH\_MENSI '

Résolution du séchage caractérisé par la loi de `MENSI`.

Dans le cas de l'utilisation de cette loi `SECH_MENSI`, il est nécessaire de s'assurer de la cohérence entre le matériau utilisé et la loi de comportement : c'est à dire que le mot clé `SECH_MENSI` a bien été renseigné dans `DEFI_MATERIAU` pour le matériau utilisé.

Modélisations supportées : analogue à `SECH_GRANGER`.

/   'SECH\_BAZANT '

Résolution du séchage caractérisé par la loi de `BAZANT`.

Dans le cas de l'utilisation de cette loi `SECH_BAZANT`, il est nécessaire de s'assurer de la cohérence entre le matériau utilisé et la loi de comportement : c'est à dire que le mot clé `SECH_BAZANT` a bien été renseigné dans `DEFI_MATERIAU` pour le matériau utilisé.

Modélisations supportées : analogue à `SECH_GRANGER`.

/    'SECH\_NAPPE'

Résolution du séchage avec un coefficient de diffusion défini par une nappe *Aster*.

Dans le cas de l'utilisation de cette loi *SECH\_NAPPE*, il est nécessaire de s'assurer de la cohérence entre le matériau utilisé et la loi de comportement : c'est à dire que le mot clé *SECH\_NAPPE* a bien été renseigné dans *DEFI\_MATERIAU* pour le matériau utilisé. Modélisations supportées : analogue à *SECH\_GRANGER*.

### 3.7.2 Opérandes TOUT / GROUP\_MA / MAILLE

```
◇    /    TOUT =            'OUI'  
     /    GROUP_MA = l_grmail  
     /    MAILLE =        l_maille
```

Spécifie les mailles sur lesquelles la relation de comportement est appliquée. De façon analogue à la mécanique, on peut utiliser plusieurs lois de séchage différentes, appliquées à des groupes de mailles complémentaires. Par contre, la thermique ne peut pas être mélangée à du séchage. Le comportement '*THER\_NL*' est nécessairement appliqué à tout le maillage, option *TOUT* : '*OUI*', option par défaut, qui est en fait, dans le cas général, transparente pour l'utilisateur.

### 3.8 Opérande EVOL\_THER\_SECH

```
◇    EVOL_THER_SECH= resuther
```

Cet opérande est spécifique à la résolution du séchage. Le séchage est résolu après un calcul thermique préalable dans le cas général, (calcul non couplé mais chaîné thermique/séchage), le champ thermique intervenant comme variable auxiliaire, permettant de calculer le coefficient de diffusion de certaines lois. C'est une donnée d'entrée du calcul du séchage, qui doit être une structure de données de type *evol\_ther*. Ce mot clé est obligatoire uniquement pour les lois '*SECH\_GRANGER*' et '*SECH\_NAPPE*', dont le coefficient de diffusion dépend de la température. La structure de données d'évolution thermique renseignée ici aura été obtenue par une exécution précédente d'un opérateur de thermique, linéaire ou non.

### 3.9 Mot clé NEWTON

```
◇    NEWTON =
```

Précise les caractéristiques de la méthode de résolution du problème non linéaire (méthode de NEWTON-RAPHSON).

#### 3.9.1 Opérande REAC\_ITER

```
◇    REAC_ITER =    /    0            [DEFAULT]  
                     /    it
```

La matrice utilisée pour les itérations globales de la méthode est la matrice tangente qui est réévaluée au début de chaque incrément de temps et toutes les *it* itérations de NEWTON pour un incrément de temps donné (précisément aux itérations de numéro *it*, *2it*, *3it*...). Donc à la première itération de NEWTON, on ne réassemble la matrice tangente que si *it* vaut 1 : sinon on garde la matrice utilisée dans la phase de prédiction. Par convention si *it* vaut 0 la matrice n'est pas réévaluée durant tout le pas de temps.

**3.9.2 Opérande RESI\_LINE\_RELA / ITER\_LINE\_MAXI**

```

◇ RESI_LINE_RELA = / 1.E-3      [DEFAULT]
                   / reslin
◇ ITER_LINE_MAXI = / 0          [DEFAULT]
                   / itlin

```

Ce sont les paramètres de la recherche linéaire qui permettent d'assurer une meilleure convergence de la méthode de NEWTON (Cf. [R5.03.01] pour plus de détails). On donne le nombre d'itérations maximum *itelin* à effectuer (la valeur par défaut 0 indique que l'on ne fait pas de recherche linéaire) et la précision *reslin* à atteindre pour réaliser la convergence de la recherche linéaire.

**Remarque :**

*Il n'est pas nécessaire de spécifier une précision ni un nombre d'itérations très élevés, la pratique montrant que 2 ou 3 itérations de recherche linéaire sont suffisantes. On peut donc se contenter de demander 3 itérations avec la précision par défaut.*

**3.10 Mot clé CONVERGENCE**

◇ CONVERGENCE :

Permet de définir les valeurs associées aux critères de convergence :

*Si aucun des deux opérandes suivants n'est présent, alors tout se passe comme si :*  
*RESI\_GLOB\_RELA = 1.E-6.*

**3.10.1 Opérande RESI\_GLOB\_RELA**

```

◇ RESI_GLOB_RELA = / 1.e-6
                   / testr

```

L'algorithme continue les itérations externes tant que le résidu relatif est supérieur à *testr*.

$$\left( \sum_{i=1, \dots, nb \text{ ddl}} (F_i^n)^2 \right)^{1/2} \left/ \left( \sum_{i=1, \dots, nb \text{ ddl}} (S_i)^2 \right)^{1/2} \right. > \text{testr}$$

où  $F_i$  désigne le résidu et  $S_i$  le chargement thermique, l'indice  $n$  désigne la  $n^{\text{ième}}$  itération.

**3.10.2 Opérande RESI\_GLOB\_MAXI**

```

◇ RESI_GLOB_MAXI = / 1.e-3
                   / testl

```

L'algorithme continue les itérations externes tant que le résidu absolu est supérieur à *testl*.

$$\max_{i=1, \dots, nb \text{ ddl}} |F_i^n| > \text{testl}$$

où  $F_i$  désigne le résidu, l'indice  $n$  désigne la  $n^{\text{ième}}$  itération.

**3.10.3 Opérande ITER\_GLOB\_MAXI**

```

◇ ITER_GLOB_MAXI = / 10
                   / iterl

```

L'algorithme continue les itérations tant que leur nombre est inférieur à *iterl*.

### 3.11 Opérande PARM\_THETA

◇ PARM\_THETA = theta

L'argument *theta* est le paramètre de la théta-méthode appliquée au problème évolutif. Il doit être compris entre 0 (méthode explicite) et 1 (méthode totalement implicite). En l'absence, du mot clé, la valeur utilisée est *theta=0.57*, un peu supérieure à *theta=0.5* correspond au schéma de Crank-Nicholson. L'incidence du choix de *theta* sur la stabilité de la méthode est détaillée dans [R5.02.02].

### 3.12 Mot clé SOLVEUR

◇ SOLVEUR =

Ce mot clé facteur est facultatif : il permet de choisir un autre solveur de résolution de système. Cet opérande est commun à l'ensemble des commandes globales [U4.50.01].

### 3.13 Mot clé ARCHIVAGE

◇ ARCHIVAGE =

Ce mot clé est facultatif : par défaut, l'ensemble des champs calculés pour tous les pas calculés est archivé dans le concept *resultat* issu de la commande. Il sert à tocker certains numéros d'ordre dans une structure de données *resultat* et/ou exclure du stockage certains champs.

**Remarque :**

| *En cas d'arrêt du calcul par manque de temps CPU, les pas de temps précédemment calculés sont sauvegardés dans la base.*

#### 3.13.1 Opérande LIST\_ARCH

Concept de type liste d'entier créé par la commande *DEFI\_LIST\_ENTI* [U4.34.02] décrivant la liste des numéros d'ordre devant être stockés dans la structure de données *resultat*.

#### 3.13.2 Opérande PAS\_ARCH

Valeur entière donnant la valeur de pas d'archivage : on stockera les numéros d'ordre multiples de la valeur *ipas* ainsi que le dernier numéro d'ordre effectivement calculé.

#### 3.13.3 Opérande CHAM\_EXCLU

Liste de textes indiquant le ou les champs exclus de l'archivage. La liste des champs possibles est décrite dans les documents sur les concepts *resultat* [U5.01].

### 3.14 Opérande OPTION

◇ OPTION = 'FLUX\_ELGA\_TEMP'

Cette option effectue le calcul du flux de chaleur aux points d'intégration à partir de la température.

◇ OPTION = 'FLUX\_ELNO\_TEMP'

Cette option effectue le calcul du flux de chaleur aux nœuds à partir de la température. Le calcul préalable de 'FLUX\_ELGA\_TEMP' n'est pas obligatoire.

### 3.15 Opérande TITRE

◇ TITRE = titre

Titre que l'on veut donner au résultat stocké dans *temper*, structure de données de type *evol\_ther* [U4.03.01].

## 4 Modélisation

Les problèmes de thermique non linéaire peuvent être traités avec des modèles utilisant les éléments finis 3D, 2D ou AXIS décrits dans les documents [U3.22.01], [U3.23.01] et [U3.23.02] et [U3.24.01].

## 5 Exemple

On a défini ci-dessous les principales commandes utilisées pour effectuer un calcul de thermique non-linéaire transitoire. L'exemple indique comment poursuivre le calcul en enrichissant le concept résultat et comment préciser le champ "initial".

```

lr8      =  DEFI_LIST_REEL    (  DEBUT   =  0.D0,
                                INTERVALLE =_F(  JUSQU_A=5.e-3, NOMBRE= 10 ),
                                INTERVALLE =_F(  JUSQU_A=5.e-2, NOMBRE= 9  ),
                                INTERVALLE =_F(  JUSQU_A=4.e-0, NOMBRE= 79 ),
                                INTERVALLE =_F(  JUSQU_A=6.e-0, NOMBRE= 20 ),
                                )

conduc   =  DEFI_FONCTION (
                                NOM_PARA   =  'TEMP',
                                VALE       =_F(  0.0 , 210.0,
                                                  660.0 , 210.0,
                                                  660.01, 95.0,
                                                  1200.00, 95.0 )
                                PROL_DROIT  =  'LINEAIRE',
                                PROL_GAUCHE =  'LINEAIRE',
                                )

enthal  =  DEFI_FONCTION (
                                NOM_PARA   =  'TEMP',
                                VALE       =_F(  0.0 , 0.0,
                                                  660.0 , 1.980E9,
                                                  660.01, 3.060E9,
                                                  1200.00, 4.451E9 )
                                PROL_DROIT  =  'LINEAIRE',
                                PROL_GAUCHE =  'LINEAIRE',
                                )

alu      =  DEFI_MATERIAU (THER_NL =_F(  LAMBDA =  conduc,
                                          BETA   =  enthal ) )

...
tempe    =  THER_NON_LINE (  MODELE=moth , CHAM_MATER=chmat,
                            TEMP_INIT   =_F(VALE       =  20.0 ),
                            INCREMENT   =_F(LIST_INST =  lr8),
                            EXCIT       =_F(CHARGE     =  chth ),
                            CONVERGENCE =_F(RESI_GLOB_RELA =1.E-6,
                                              ITER_GLOB_MAXI =10 ),
                            )

...
tempe    =  THER_NON_LINE (  reuse =  tempe,
                            MODELE=moth , CHAM_MATER=chmat,
                            TEMP_INIT   =_F(EVOL_THER =  tempe,
                                              NUME_INIT =  20),
                            INCREMENT   =_F(LIST_INST =  lr8),
                            EXCIT       =_F(CHARGE     =  chth ),
                            CONVERGENCE =_F(RESI_GLOB_RELA = 1.E-6,
                                              ITER_GLOB_MAXI= 10 )
                            )

...
FIN();

```

Page laissée intentionnellement blanche.