

CALCULS THERMIQUES

OPTIONS

MODELES

MATERIAUX

CONDITIONS AUX LIMITES

CHARGEMENT

RESOLUTION (PERMANENT)

EXEMPLES

Exemple de base

Utilisation des super-éléments

NON LINEAIRE PERMANENT

EXEMPLES

Exemple de base

Approche de la Convection

Le Rayonnement

TRANSITOIRE LINEAIRE

EXEMPLES

Pour faire une reprise avec PASAPAS

Problème de diffusion

TRANSITOIRE NON LINEAIRE

EXEMPLES

Pour faire une reprise avec PASAPAS

Approche de la Convection

Le Rayonnement

Le Changement de Phase

REFERENCES GENERALES

ANNEXE THEORIQUE

REPERES BIOGRAPHIQUES

Philippe PASQUET

16/09/1999

©php

TABLE DES MATIERES

AVERTISSEMENT	5
2. QUANTITES ET NOMBRES CARACTERISTIQUES EN THERMIQUE	9
2.1 QUANTITES	9
2.2 NOMBRES SANS DIMENSION	10
a) Conduction	10
b) Convection	10
c) Rayonnement	13
3. QUELQUES VALEURS CARACTERISTIQUES EN THERMIQUE	14
4. SYSTEMES D'UNITES EN DIFFUSION	15
5. QUANTITES CARACTERISTIQUES EN DIFFUSION	16
6. QUELQUES VALEURS CARACTERISTIQUES EN DIFFUSION	17
7. OPTIONS DE CALCULS THERMIQUES	18
8. MODELES THERMIQUES	19
8.1 DESCRIPTION DE LA SYNTAXE	19
8.2 CORRESPONDANCE GEOMETRIE-ELEMENTS FINIS	20
a) MODEle THERMIQUE	20
b) MODEle CONVECTION ou RAYONNEMENT	20
8.3 DESCRIPTION DES ELEMENTS FINIS SOLIDES	22
a) Eléments unidimensionnels	22
b) Eléments bidimensionnels plans	22
c) Eléments bidimensionnels axisymétriques	22
d) Eléments tridimensionnels surfaciques	23
f) Eléments tridimensionnels massifs	23
8.4 DESCRIPTION DES ELEMENTS FINIS CONVECTION	25
a) Eléments bidimensionnels plans	25
b) Eléments bidimensionnels axisymétriques	25
c) Eléments tridimensionnels surfaciques	25
d) Eléments tridimensionnels massifs	26
9. MATERIAUX EN THERMIQUE	28
9.1 MATERIAUX ISOTROPES	28

9.2 MATERIAUX ORTHOTROPES	29
a) Coques	29
b) Massifs bidimensionnels	29
c) Massifs tridimensionnels	29
9.3 MATERIAUX ANISOTROPES	30
a) Massifs bidimensionnels	30
b) Massifs tridimensionnels	30
9.4 MATERIAUX NON LINEAIRES	31
9.5 MATERIAUX CONVECTION	32
a) Cas CONVECTION	32
b) Cas CONVECTION SUPERIEURE	32
c) Cas CONVECTION INFERIEURE	32
9.6 MATERIAUX RAYONNEMENT	33
10. CONDITIONS AUX LIMITES THERMIQUES	34
11. CHARGEMENTS THERMIQUES	36
12. RESOLUTION EN THERMIQUE (REGIME PERMANENT)	40
13. EXEMPLES PERMANENTS LINEAIRES THERMIQUES	42
13.1 EXEMPLE DE BASE	42
13.2 UTILISATION DES SUPER-ELEMENTS	44
14. CALCULS PERMANENTS NON LINEAIRES THERMIQUES	47
15. EXEMPLES PERMANENTS NON LINEAIRES THERMIQUES	50
15.1 EXEMPLE DE BASE	50
15.2 APPROCHE DE LA CONVECTION	53
a) Rappel sur la Convection Forcée	53
b) La Convection Naturelle	53
c) Application : Prise en compte d'un coefficient h variable dans CASTEM2000®	54
d) Calcul des bilans	55
15.3 LE RAYONNEMENT	56
a) Cas du milieu infini	56
b) Cas du face à face	56
c) Cas de la cavité	58
16. CALCULS TRANSITOIRES LINEAIRES THERMIQUES	59
17. EXEMPLES TRANSITOIRES LINEAIRES THERMIQUES	62
17.1 POUR FAIRE UNE REPRISE AVEC PASAPAS	62

17.2 PROBLEME DE DIFFUSION	63
18. CALCULS TRANSITOIRES NON LINEAIRES THERMIQUES	65
19. EXEMPLES TRANSITOIRES NON LINEAIRES THERMIQUES	69
19.1 POUR FAIRE UNE REPRISE AVEC PASAPAS	69
19.2 APPROCHE DE LA CONVECTION	70
a) Rappel sur la Convection Forcée	70
b) La Convection Naturelle	70
c) Application : Prise en compte d'un coefficient h variable dans CASTEM2000®	71
d) Calcul des bilans	71
19.3 LE RAYONNEMENT	73
a) Cas du milieu infini	73
b) Cas du face à face	73
c) Cas de la cavité	75
19.4 LE CHANGEMENT DE PHASE	76
20. TYPE D'OBJETS CREES	77
21. ESSAI DE RECENSEMENT DES VALEURS PAR DEFAUT	79
22. REFERENCES GENERALES	80
23. ANNEXE THEORIQUE	82
23.1 SCHEMA TRANSITOIRE LINEAIRE	82
23.2 SCHEMA TRANSITOIRE NON LINEAIRE	83
a) Schéma transitoire	83
b) Schéma itératif	83
23.3 SCHEMA TRANSITOIRE DUPONT2	84
a) Premier pas	84
b) Pas suivants	84
23.4 POURQUOI DIAGONALISER LA MATRICE DE CAPACITE	86
a) Un premier exemple éloquent : choc thermique	86
b) Un deuxième exemple éloquent : températures imposées	88
c) Un troisième exemple éloquent : température et flux imposés	90
d) Conclusion	92
24. REPERES BIOGRAPHIQUES	93
25. INDEX	94

AVERTISSEMENT

Le volume Thermique des structures fait partie d'un ensemble comprenant les titres suivants

Maillage et Présentation du Langage
Vérification des données
Thermique des Structures
Mécanique des Structures
Mécanique des Fluides
Electromagnétisme
Post-Traitements

Nous avons repris dans ce volume, l'ensemble des opérateurs, procédures, directives permettant les calculs thermiques. Ils ne sont pas décrits dans leur intégralité mais dans leur acception la plus couramment utilisée. Le lecteur intéressé peut, pour obtenir l'intégralité des possibilités d'un opérateur, faire **INFO** nom ; dans CASTEM2000[®]. Dans la description qui suit, nous considérons que le maillage est construit et nous nous arrêtons à l'opérateur **RESO** ou à la procédure **PASAPAS**. En particulier, on ne calcule pas de gradients. Pour ces calculs et tous les dépouillements postérieurs, on se reportera au volume Post-Traitements.

Nous avons aussi essayé de faire un peu plus qu'un guide d'utilisation. Le lecteur s'en rendra, nous l'espérons, compte tout au long de ce volume et en particulier dans les premiers et derniers chapitres.

Ce volume, comme l'ensemble de ce manuel, est nécessairement incomplet et malheureusement, il n'est pas exempt d'erreurs. Nous serions particulièrement reconnaissants aux lecteurs qui nous signaleront toute imperfection.

Nous avons déterminé quatre classes de problèmes :

- le problème permanent linéaire,
- le problème permanent non linéaire incluant tous les phénomènes indépendants du temps en particulier le rayonnement ou la convection naturelle sous forme simplifiée,
- le problème transitoire linéaire comprenant les problèmes de diffusion gazeuse,
- le problème transitoire non linéaire incluant les phénomènes dépendant du temps et de la température et en particulier le changement de phase.

Chacune des classes comportent plusieurs exemples par sous-type afin d'éviter tout mélange de difficultés. L'utilisateur prendra rapidement l'habitude de coupler les difficultés et se rendra compte de la relative facilité à le faire.

Nous n'avons pas repris de manière systématique la description des erreurs possibles dans CASTEM2000[®]. Les erreurs de syntaxe sont bien contrôlées et le diagnostic est relativement clair sauf dans le cas où le point virgule (;) a été omis. Les erreurs les plus sournoises sont la conséquence de l'ouverture et de la permissivité de CASTEM2000[®] qui permet d'enchaîner toutes les opérations.

Il y a très peu de valeurs par défaut dans CASTEM2000[®] : dans la suite, on trouvera un essai de recensement de ces valeurs (voir page 79). Pour attirer l'attention du lecteur-utilisateur signalons le **MODEle**, le type d'élément fini (opérateur **MODEle**), les conditions de blocages (opérateur **DEPImposé**) ou de chargement (opérateur **CONvection**), certains paramètres de la procédure **PASAPAS** (en particulier les valeurs initiales et le type de schéma transitoire).

Rappelons enfin que tout nom d'objets (choisi par l'utilisateur) doit être différent d'un nom d'opérateur (imposé par CASTEM2000[®] -sauf directive **MOT-**). Pour ne pas être

handicaper par cette restriction, on peut mettre les noms d'opérateurs entre ‘’ et dans ce cas là en majuscules.

Les calculs thermiques sont aussi possibles avec les opérateurs de mécanique des fluides. On trouvera des exemples dans le volume MECANIQUE DES FLUIDES, ainsi que de nombreuses extensions.

1. SYSTEMES D'UNITES EN THERMIQUE

On définit les systèmes d'unités cohérents à partir des unités suivantes.

unité	SI	SB	SC	SD	SU
masse	kg	kg	cal.m ⁻¹	cal.mm ⁻¹	lbm
longueur	m	mm	m	mm	ft
température	K	K	K	K	°F
temps	s	s	s	s	hr

Dans le tableau suivant, on a les facteurs (coef) entre SI et Sx tels que : SI = coef x Sx

	SI	SB	SC	SD	SU
accélération	m.s ⁻²	10 ³	1	10 ³	4.252 10 ⁷ ft. hr ⁻²
angle	rad	1	1	1	1
chaleur latente	J.kg ⁻¹	10 ⁶	0.239	0.239	0.430 10 ⁻³
chaleur massique	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	10 ⁶	0.239	0.239	2.388 10 ⁻⁴
chaleur volumique	J.m ⁻³ .K ⁻¹	10 ⁻⁶	0.239	0.239 10 ⁻⁹	
coefficient d'absorption	m ⁻¹	10 ⁻³			0.3048
coefficient d'échange	W.m ⁻² .K ⁻¹	10 ⁻³	0.239	0.239 10 ⁻⁶	0.1760
conductance	W.m ⁻² .K ⁻¹	10 ⁻³	4.187	4.187 10 ⁶	0.1760
conductibilité	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	1	0.239	0.239 10 ⁻³	0.5778
constante de Stefan	5.67 10 ⁻⁸ W. m ⁻² .K ⁻⁴	10 ³	0.239	0.239	0.171 10 ⁻⁸ Btu.hr ⁻¹ .ft ⁻² .F ⁻⁴
diffusivité	m ² .s ⁻¹	10 ⁶			38750.08
émissivité	sans unité				
enthalpie	J				9.478 10 ⁻⁴ btu
entropie	J.K ⁻¹				btu.°F ⁻¹
épaisseur	m	10 ³	1	10 ³	3.2808 ft
flux	W.m ⁻²	10 ⁻³	0.239	0.239.10 ⁻⁶	0.3170 btu.ft ⁻² .hr ⁻¹
gradient	K.m ⁻¹	10 ⁻³	1	10 ⁻³	
longueur	m	10 ³	1	10 ³	3.2808 ft
masse	kg	10 ⁻³	1	1	2.2046 lbm
masse volumique	kg.m ⁻³	10 ⁻¹²	1	10 ⁻⁹	0.0624
résistance thermique	K.m ² .W ⁻¹	10 ³	4.187	4.187 10 ⁶	5.6783
section	m ²	10 ⁶	1	10 ⁶	10.7639 ft ²
source ponctuelle	W	10 ³	0.239	0.239	3.4122 btu.hr ⁻¹
source volumique	W.m ⁻³	10 ⁻⁶	0.239	0.239 10 ⁻⁹	0.0966 btu.ft ⁻³ .hr ⁻¹
surface	m ²	10 ⁶	1	10 ⁶	10.7639 ft ²
température	K	1	1	1	(0.556 °F + 255.37)
différence de température	K	1	1	1	0.556 °F
temps	s	1	1	1	2.778 10 ⁻⁴ hr
viscosité cinématique	m ² .s ⁻¹	10 ⁶			38750.08 ft ² .hr ⁻¹

viscosité dynamique	Pl (Pa.s)				0.580 10 ⁻⁵
vitesse	m.s ⁻¹	10 ³	1	10 ³	11811.02
vitesse rotatoire	rad.s ⁻¹	1	1	1	3600
volume	m ³	10 ⁹	1	10 ⁹	35.3147

2. QUANTITES ET NOMBRES CARACTERISTIQUES EN THERMIQUE

2.1 QUANTITES

- Relation entre la température en Kelvin et la température en °Celsius :

$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273.15^{\circ}C$$

- Relation entre la viscosité cinématique et la viscosité dynamique :

$$\mu = \nu \rho$$

dans laquelle

μ viscosité dynamique
 ρ masse volumique
 ν viscosité cinématique

- La constante de Stefan-Boltzmann σ est donnée par la formule :

$$\sigma = \frac{\pi^2}{60} \cdot \frac{k^4}{\hbar^3 c^2}$$

dans laquelle

k constante de Boltzmann $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$
 \hbar constante de Planck rationalisée $1.05 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$
 c vitesse de la lumière dans le vide (ou dans l'air) $3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

La valeur SI est $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W. m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

- La diffusivité est définie par la relation

$$D = \frac{\lambda}{\rho C}$$

dans laquelle

λ conductivité
 C chaleur massique
 ρ masse volumique
L'unité SI est le $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$

- L'effusivité est définie par la relation

$$B = \sqrt{\lambda \rho C}$$

dans laquelle

λ conductivité
 C chaleur massique
 ρ masse volumique
L'unité SI est le $\text{J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-0.5}$

2.2 NOMBRES SANS DIMENSION

a) Conduction

- Le nombre de **Biot** est défini par la relation. (Il caractérise le rapport entre résistance interne et résistance surfacique)

$$Bi = \frac{hL}{\lambda}$$

dans laquelle

h conductance

L longueur caractéristique (=3V/S)

λ conductibilité du solide

sans dimension

- Le nombre de **Fourier** est défini par la relation. (Il caractérise la pénétration de la chaleur en régime transitoire)

$$Fo = \frac{D\tau}{L^2}$$

dans laquelle

D diffusivité

τ temps caractéristique

L longueur caractéristique

sans dimension

b) Convection

- Le nombre de **Euler** est défini par la relation. (Il caractérise le rapport de l'inertie sur la gravité)

$$Eu = \frac{P}{\rho U^2}$$

dans laquelle

U vitesse

ρ masse volumique

P pression

sans dimension

- Le nombre de **Froude** est défini par la relation. (Il caractérise le rapport de l'inertie sur la gravité dans un écoulement à surface libre)

$$Fr = \frac{U^2}{gL}$$

dans laquelle

U vitesse

g accélération de la pesanteur

L longueur caractéristique

sans dimension

- Le nombre de **Grashof** est défini par la relation. (Il caractérise le régime d'écoulement du fluide en convection naturelle en exprimant le rapport entre forces dues à la viscosité et forces d'inertie dues à la densité.)

$$Gr = \frac{L^3 \rho^2 g \beta \Delta T}{\mu^2}$$

dans laquelle

- μ viscosité dynamique
- g accélération de la pesanteur
- L longueur caractéristique
- ρ masse volumique
- β coefficient de dilatation du fluide (pour les gaz parfaits $\beta = T^{-1}$)
- ΔT différence de température entre fluide et paroi
- sans dimension

- Le nombre de **Griffith** est défini par la relation (il caractérise la part d'échauffement due à la viscosité)

$$Gf = \frac{\mu U^2}{\lambda A}$$

dans laquelle

- U vitesse
- μ viscosité dynamique
- λ conductibilité
- sans dimension

- Le nombre de **Mach** est défini par la relation. (Il caractérise le caractère de l'écoulement en aérodynamique - $M > 1$ supersonique ; $M < 1$ subsonique)

$$Ma = \frac{U}{a}$$

dans laquelle

- U vitesse
- a vitesse du son
- sans dimension

- Le nombre de **Margoulis** (ou de **Stanton**) est défini par la relation.

$$Ma(ouSt) = \frac{h}{\rho C U} = \frac{Nu}{Re * Pr}$$

dans laquelle

- H coefficient d'échange
- ρ masse volumique
- C chaleur spécifique
- U vitesse
- Nu nombre de Nusselt
- Pr nombre de Prandtl
- Re nombre de Reynolds
- sans dimension

- Le nombre de **Nusselt** est défini par la relation. (Il caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi - convection et conduction-.)

$$\text{Nu} = \frac{hL}{\lambda}$$

dans laquelle

h coefficient d'échange
L longueur caractéristique
 λ conductibilité du fluide
sans dimension

- Le nombre de **Peclet** est défini par la relation

$$\text{Pe} = \frac{UL}{D} = \text{Re} * \text{Pr}$$

dans laquelle

U vitesse
L longueur caractéristique
D diffusivité
sans dimension

- Le nombre de **Prandtl** est défini par la relation. (Il caractérise les propriétés thermiques du fluide, rapport entre quantité de mouvement et chaleur.)

$$\text{Pr} = \frac{\mu C}{\lambda} = \frac{\nu}{D}$$

dans laquelle

μ viscosité dynamique
C chaleur spécifique
 λ conductibilité
sans dimension

- Le nombre de **Rayleigh** est défini par la relation. (Il caractérise le seuil d'apparition de la convection)

$$\text{Ra} = \text{Gr} * \text{Pr}$$

dans laquelle

Gr nombre de Grashof
Pr nombre de Prandtl
sans dimension

- Le nombre de **Reynolds** est défini par la relation. (Il caractérise le régime d'écoulement du fluide en convection forcée.)

$$\text{Re} = \frac{UL\rho}{\mu}$$

dans laquelle

μ viscosité dynamique
U vitesse
L longueur caractéristique
 ρ masse volumique

sans dimension

L'écoulement est laminaire si $Re < 5 \cdot 10^5$

c) Rayonnement

- Le nombre de **Weber** est défini par la relation.

$$We = \frac{\rho U^2 L}{\varepsilon}$$

dans laquelle

ε émissivité

U vitesse

L longueur caractéristique

ρ masse volumique

unité de masse

3. QUELQUES VALEURS CARACTERISTIQUES EN THERMIQUE

On trouvera ici quelques ordres de grandeur (à 293 K) que l'utilisateur devra vérifier avant toute utilisation. On appelle

- ρ masse volumique
- λ conductibilité
- C_p chaleur massique
- L chaleur latente
- θ_f température de changement de phase
- ϵ émissivité ou absorption $0 \leq \epsilon \leq 1$

	ρ kg.m ⁻³	λ W.m ⁻¹ .K ⁻¹	C_p J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	L 10 ³ J.kg ⁻¹	θ_f K	ϵ^1
Acier	7 850	10 à 50	450		1 625	0.25 à 0.90
Aluminium	2 700	230	890	390	930	0.05
Béton	2 300	2	900			0.6 à 0.7
Bois //	500 à 1 000	0.2	2 000			0.9
Caoutchouc	1 200	0.1	700 à 1500		400	0.85 à 0.95
Cuivre	9 000	395	385	205	1 355	0.05 à 0.75
Fonte	7 200	40	500		1 470	0.45 à 0.95
Plexiglas	1 200	0.2				
Plomb	11 500	35	125	25	600	0.3 à 0.4
Résine époxy	1 200					
Roche	2 500	2	800			0.4 à 0.6
Titane	4 500	10 à 50	460		2 000	
Verre	2 500	1	800		1 500	0.9
Zinc	7 100	115	390	110	695	0.25

¹ selon l'état de surface - 0=poli, vif, glacé ; 1=noir, oxydé, rugueux

4. SYSTEMES D'UNITES EN DIFFUSION

On définit les systèmes d'unités cohérents à partir de l'unité de longueur et de l'unité de force.

unité	SI	SA	SB	SC	SD	SE
force	N	N	N	cal.m ⁻¹	cal.mm ⁻¹	cal.cm ⁻¹
longueur	m	cm	mm	m	mm	cm

	SI	SA	SB	SC	SD	SE
angle	rad	1	1	1	1	1
concentration massique	kg.m ⁻³	10 ⁻⁸	10 ⁻¹²	10 ³	10 ³	10 ²
concentration volumique	m ³ .m ⁻³	1	1	1	1	1
constante des gaz parfaits	8.3144 J.K ⁻¹ .mole ⁻¹	10 ²	10 ³			
diffusion	m ² .s ⁻¹	10 ⁴	10 ⁶			
énergie	J	10 ²	10 ³			
épaisseur	m	10 ⁴	10 ⁶			
longueur	m	10 ²	10 ³			
perméation	m ³ .m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ^{-0.5}	10 ⁶	10 ⁹			
pression	Pa	10 ⁻⁴	10 ⁻⁶			
surface	m ²	10 ⁴	10 ⁶	1	10 ⁶	10 ⁴
température	K	1	1	1	1	1
temps	s	1	1	1	1	1
vitesse	m.s ⁻¹	10 ²	10 ³	1	10 ³	10 ²
volume	m ³	10 ⁶	10 ⁹	1	10 ⁹	10 ⁶

5. QUANTITES CARACTERISTIQUES EN DIFFUSION

- Le coefficient de diffusion est donné par la formule :

$$D = D_0 e^{-\frac{W}{RT}}$$

dans laquelle

D_0

W énergie d'activation en diffusion

R constante des gaz parfaits $8.3144 \text{ J.K}^{-1}.\text{mole}^{-1}$

T température absolue

L'unité SI est le $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$

- La concentration sur une surface est donnée par :

$$C = \frac{Pe}{D} \sqrt{\Delta P}$$

dans laquelle

Pe coefficient de perméation

D coefficient de diffusion

ΔP différence de pression

6. QUELQUES VALEURS CARACTERISTIQUES EN DIFFUSION

On trouvera ici quelques ordres de grandeur (à 293 K) que l'utilisateur devra vérifier avant toute utilisation. On appelle

ρ masse volumique

D coefficient de diffusion

	ρ kg.m ⁻³	D m ² .s ⁻¹
Acier	7 850	
Aluminium	2 700	
Béton	2 300	
Bois //	500 à 1 000	
Caoutchouc	1 200	
Cuivre	9 000	
Fonte	7 200	
Plexiglas	1 200	
Plomb	11 500	
Résine époxy	1 200	
Roche	2 500	
Titane	4 500	
Verre	2 500	
Zinc	7 100	

7. OPTIONS DE CALCULS THERMIQUES

OPTIon

Directive permettant de définir le type de calcul. Dépendant du type de maillage.

Si le maillage est fait avec OPTIon DIMENSION 2

AXISymétrie Les degrés de liberté dépendent du type d'éléments finis T plus éventuellement TINF et TSUP. Dans ce cas géométrie, chargements et conditions aux limites respectent la même symétrie de révolution. Les axes sont R (radial) et Z (axial); tous les R doivent être positifs.

PLAN Les degrés de liberté dépendent du type d'éléments finis T plus éventuellement TINF et TSUP. C'est l'option par défaut. Les axes sont X et Y.

Il n'y a pas d'OPTIon FOURier en thermique.

Si le maillage est fait avec OPTIon DIMENSION 3

TRIDimensionnel Les degrés de liberté dépendent du type d'éléments finis T plus éventuellement TINF et TSUP. Les axes sont X, Y (axes horizontaux) et Z (axe vertical).

8. MODELES THERMIQUES

8.1 DESCRIPTION DE LA SYNTAXE

Le modèle est appliqué sur un MAILLAGE et sera relatif à un matériau. Il a pour but de spécifier une formulation éléments-finis ce qui va impliquer le nom des inconnues et de toutes quantités déduites (gradients ..) et le type de matériau. La forme la plus simple est (si TOTO est le MAILLAGE en question)

MO1 = **MODE TOTO THERMIQUE ISOTROPE** (noms des éléments) ;
à laquelle il faut souvent ajouter (si TITI est le MAILLAGE en question)

MO2 = **MODE TITI CONVECTION (SUPERIEURE ou INFERIEURE** (noms des éléments)) ;

Les noms des éléments sont implicites en thermique, sauf dans quelques cas particuliers (en 2D conduction, l'élément géométrique SEG2 peut être soit COQ2 soit BARRe). Voir le tableau suivant à ce sujet.

Premier pas non linéaire

Si l'on impose une condition de type rayonnement sur (noms des éléments) :

MO3 = **MODE TITI RAYONNEMENT** (noms des éléments) ;

Si, sur la même géométrie, on veut imposer plusieurs modèles (par exemple convection et rayonnement ou convection sur les deux faces d'une coque), il faut ajouter

CONStituant nomcons

Les modèles disponibles

**THERMIQUE ISOTROPE
THERMIQUE ORTHOTROPE
THERMIQUE ANISOTROPE**

**CONVECTION
CONVECTIONSUPERIEURE
CONVECTION INFERIEURE**

RAYONNEMENT

8.2 CORRESPONDANCE GEOMETRIE-ELEMENTS FINIS

Les valeurs par défaut sont entre parenthèses. La géométrie contient le nom après opération de maillage, tandis que l'élément fini est à choisir dans l'opérateur MODEle.

a) MODEle THERMIQUE

C'est le support géométrique qui permet de faire le lien avec les calculs mécaniques (voir le volume Mécanique des Structures).

Géométrie	Eléments finis	DDL	Mode
SEG2	BARR COQ2	T T,TINF,TSUP	PLAN,TRID AXIS
TRI3	(TRI3) COQ3	T T,TINF,TSUP	PLAN,AXIS TRID
QUA4	(QUA4) COQ4	T T,TINF,TSUP	PLAN,AXIS TRID
TRI6	(TRI6) COQ6	T T,TINF,TSUP	PLAN,AXIS TRID
QUA8	(QUA8) COQ8	T T,TINF,TSUP	PLAN,AXIS TRID
TET4	(TET4)	T	TRID
PYR5	(PYR5)	T	TRID
PRI6	(PRI6)	T	TRID
CUB8	(CUB8)	T	TRID
TE10	(TE10)	T	TRID
PY13	(PY13)	T	TRID
PR15	(PR15)	T	TRID
CU20	(CU20)	T	TRID

b) MODEle CONVECTION ou RAYONNEMENT

Géométrie	Eléments finis	DDL	Mode	Face de
SEG2	(SEG2) COQ2	T TINF ou TSUP	PLAN,AXIS AXIS	TRI3,QUA4 COQ2
SEG3	(SEG3)	T	PLAN,AXIS	TRI6,QUA8
TRI3	(TRI3) COQ3	T TINF ou TSUP	TRID TRID	TET4,PYR5,PRI6 COQ3
QUA4	(QUA4) COQ4	T TINF ou TSUP	TRID TRID	PYR5,PRI6,CUB8 COQ4
TRI6	(TRI6) COQ6	T TINF ou TSUP	TRID TRID	TE10,PY13,PR15 COQ6

QUA8	(QUA8) COQ8	T TINF ou TSUP	TRID TRID	PY13,PR15,CU20 COQ8
RAC2	(RAC2)	T	PLAN,AXIS	TRI3,QUA4
RAC3	(RAC3)	T	PLAN,AXIS	TRI6,QUA8
LIA3	(LIA3)	T	TRID	TET4,PYR5,PRI6
LIA4	(LIA4)	T	TRID	PYR5,PRI6,CUB8
LIA6	(LIA6)	T	TRID	TE10,PY13,PR15
LIA8	(LIA8)	T	TRID	PY13,PR15,CU20

Les éléments :

RAC2	2 SEG2 superposés
RAC3	2 SEG3 superposés
LIA3	2 TRI3 superposés
LIA4	2 QUA4 superposés
LIA6	2 TRI6 superposés
LIA8	2 QUA8 superposés

sont utilisés pour modéliser le rayonnement face à face (h variable) ou les résistances thermiques. Dans ce cas le coefficient de convection fourni dans **MATER** est la conductance ou l'inverse de la résistance thermique. En effet $\Phi = \Delta T / r$.

8.3 DESCRIPTION DES ELEMENTS FINIS SOLIDES

a) Eléments unidimensionnels

L'élément **BARRE OPTI DIME 2 (ou 3) MODE PLAN (ou TRID) ELEM SEG2 ;**
segment à 2 nœuds
1 degré de liberté par nœuds T
défini par sa section composante SECTION de MATERIAU
interpolation linéaire

b) Eléments bidimensionnels plans

L'élément **TRI3 OPTI DIME 2 MODE PLAN ELEM TRI3 ;**
triangle à 3 nœuds
1 degré de liberté par nœuds T
interpolation linéaire

L'élément **QUA4 OPTI DIME 2 MODE PLAN ELEM QUA4 ;**
quadrangle à 4 nœuds
1 degré de liberté par nœuds T
interpolation linéaire

L'élément **TRI6 OPTI DIME 2 MODE PLAN ELEM TRI6 ;**
triangle à 6 nœuds
1 degré de liberté par nœuds T
interpolation quadratique

L'élément **QUA8 OPTI DIME 2 MODE PLAN ELEM QUA8 ;**
quadrangle à 8 nœuds
1 degré de liberté par nœuds T
interpolation quadratique

c) Eléments bidimensionnels axisymétriques

L'élément **COQ2 OPTI DIME 2 MODE AXIS ELEM SEG2 ;**
segment à 2 nœuds
3 degrés de liberté par nœuds T, TINF, TSUP
défini par son épaisseur composante EPAISSEUR de MATERIAU
interpolation linéaire

L'élément **TRI3 OPTI DIME 2 MODE AXIS ELEM TRI3 ;**
triangle à 3 nœuds
1 degré de liberté par nœuds T
interpolation linéaire

L'élément **QUA4 OPTI DIME 2 MODE AXIS ELEM QUA4 ;**
quadrangle à 4 nœuds
1 degré de liberté par nœuds T
interpolation linéaire

L'élément **TRI6 OPTI DIME 2 MODE AXIS ELEM TRI6 ;**

triangle à 6 nœuds
 1 degré de liberté par nœuds T
 interpolation quadratique
 L'élément QUA8 **OPTI DIME 2 MODE AXIS ELEM QUA8 ;**
 quadrangle à 8 nœuds
 1 degré de liberté par nœuds T
 interpolation quadratique

d) Eléments tridimensionnels surfaciques

L'élément COQ3 **OPTI DIME 3 MODE TRID ELEM TRI3 ;**
 triangle à 3 nœuds
 3 degrés de liberté par nœuds T, TINF, TSUP
 défini par son épaisseur composante EPAISseur de MATERiau
 interpolation linéaire

L'élément COQ4 **OPTI DIME 3 MODE TRID ELEM QUA4 ;**
 quadrangle à 4 nœuds
 non nécessairement plan mais cotés droits
 3 degrés de liberté par nœuds T, TINF, TSUP
 défini par son épaisseur composante EPAISseur de MATERiau
 interpolation linéaire

L'élément COQ6 **OPTI DIME 3 MODE TRID ELEM TRI6 ;**
 triangle à 6 nœuds
 cotés courbes
 3 degrés de liberté par nœuds T, TINF, TSUP
 défini par son épaisseur composante EPAISseur de MATERiau
 interpolation parabolique

L'élément COQ8 **OPTI DIME 3 MODE TRID ELEM QUA8 ;**
 quadrangle à 8 nœuds
 cotés courbes
 3 degrés de liberté par nœuds T, TINF, TSUP
 défini par son épaisseur composante EPAISseur de MATERiau
 interpolation parabolique

f) Eléments tridimensionnels massifs

L'élément TET4 **OPTI DIME 3 MODE TRID ELEM CUB8 ;**
 tétraèdre à 4 nœuds
 arêtes droites
 4 faces TRI3
 1 degré de liberté par nœuds T
 interpolation linéaire

L'élément PYR5 **OPTI DIME 3 MODE TRID ELEM CUB8 ;**
 pyramide à 5 nœuds
 arêtes droites
 3 faces TRI3 et 1 face QUA4
 1 degré de liberté par nœuds T

interpolation linéaire
L'élément PRI6 **OPTI DIME 3 MODE TRID ELEM PRI6 ;**
prisme à 6 nœuds
arêtes droites
2 faces TRI3 et 3 faces QUA4
1 degré de liberté par nœuds T
interpolation linéaire

L'élément CUB8 **OPTI DIME 3 MODE TRID ELEM CUB8 ;**
hexaèdre à 8 nœuds
arêtes droites
6 faces QUA4
1 degré de liberté par nœuds T
interpolation linéaire

L'élément TE10 **OPTI DIME 3 MODE TRID ELEM CU20 ;**
tétraèdre à 10 nœuds
arêtes courbes
4 faces TRI6
1 degré de liberté par nœuds T
interpolation parabolique

L'élément PY13 **OPTI DIME 3 MODE TRID ELEM CU20 ;**
pyramide à 13 nœuds
arêtes courbes
3 faces TRI6 et 1 face QUA8
1 degré de liberté par nœuds T
interpolation parabolique

L'élément PR15 **OPTI DIME 3 MODE TRID ELEM PR15 ;**
prisme à 15 nœuds
arêtes courbes
2 faces TRI6 et 3 faces QUA8
1 degré de liberté par nœuds T
interpolation parabolique

L'élément CU20 **OPTI DIME 3 MODE TRID ELEM CU20 ;**
hexaèdre à 20 nœuds
arêtes courbes
6 faces QUA8
1 degré de liberté par nœuds T
interpolation parabolique

8.4 DESCRIPTION DES ELEMENTS FINIS CONVECTION

Ces éléments sont aussi valides pour les MODEle RAYONNEMENT.

a) Eléments bidimensionnels plans

L'élément SEG2 **OPTI DIME 2 MODE PLAN ELEM SEG2 ;**

segment à 2 nœuds, coté de TRI3 ou QUA4

1 degré de liberté par nœuds T

interpolation linéaire

L'élément SEG3 **OPTI DIME 2 MODE PLAN ELEM SEG3 ;**

segment à 2 nœuds, coté de TRI6 ou QUA8

1 degré de liberté par nœuds T

interpolation linéaire

L'élément RAC2 **OPTI DIME 2 MODE PLAN ELEM RAC2 ;**

raccord à 2x2 nœuds, connexion entre TRI3 et QUA4

1 degré de liberté par nœuds T

interpolation linéaire

L'élément RAC3 **OPTI DIME 2 MODE PLAN ELEM RAC3 ;**

raccord à 2x3 nœuds, connexion entre TRI6 et QUA8

1 degré de liberté par nœuds T

interpolation linéaire

b) Eléments bidimensionnels axisymétriques

L'élément SEG2 **OPTI DIME 2 MODE AXIS ELEM SEG2 ;**

segment à 2 nœuds, coté de TRI3 ou QUA4

1 degré de liberté par nœuds T

interpolation linéaire

L'élément SEG3 **OPTI DIME 2 MODE AXIS ELEM SEG3 ;**

segment à 2 nœuds, coté de TRI6 ou QUA8

1 degré de liberté par nœuds T

interpolation linéaire

L'élément RAC2 **OPTI DIME 2 MODE AXIS ELEM RAC2 ;**

raccord à 2x2 nœuds, connexion entre TRI3 et QUA4

1 degré de liberté par nœuds T

interpolation linéaire

L'élément RAC3 **OPTI DIME 2 MODE AXIS ELEM RAC3 ;**

raccord à 2x3 nœuds, connexion entre TRI6 et QUA8

1 degré de liberté par nœuds T

interpolation linéaire

c) Eléments tridimensionnels surfaciques

L'élément COQ3 **OPTI DIME 3 MODE TRID ELEM TRI3 ;**

- triangle à 3 nœuds, face de COQ3
 1 degré de liberté par nœuds TINF ou TSUP
 interpolation linéaire
- L'élément COQ4 **OPTI DIME 3 MODE TRID ELEM QUA4 ;**
 quadrangle à 4 nœuds, face de COQ4
 non nécessairement plan mais cotés droits
 1 degré de liberté par nœuds TINF ou TSUP
 interpolation linéaire
- L'élément COQ6 **OPTI DIME 3 MODE TRID ELEM TRI6 ;**
 triangle à 6 nœuds, face de COQ6
 cotés courbes
 1 degré de liberté par nœuds TINF ou TSUP
 interpolation parabolique
- L'élément COQ8 **OPTI DIME 3 MODE TRID ELEM QUA8 ;**
 quadrangle à 8 nœuds, face de COQ8
 cotés courbes
 1 degré de liberté par nœuds TINF ou TSUP
 interpolation parabolique

d) Eléments tridimensionnels massifs

- L'élément TRI3 **OPTI DIME 3 MODE TRID ELEM TRI3 ;**
 triangle à 3 nœuds, face de TET4, PYR5 ou PRI6
 1 degré de liberté par nœuds T
 interpolation linéaire
- L'élément QUA4 **OPTI DIME 3 MODE TRID ELEM QUA4 ;**
 quadrangle à 4 nœuds, face de PYR5, PRI6 ou CUB8
 non nécessairement plan mais cotés droits
 1 degré de liberté par nœuds T
 interpolation linéaire
- L'élément TRI6 **OPTI DIME 3 MODE TRID ELEM TRI6 ;**
 triangle à 6 nœuds, face de TE10, PY13 ou PR15
 cotés courbes
 1 degré de liberté par nœuds T
 interpolation parabolique
- L'élément QUA8 **OPTI DIME 3 MODE TRID ELEM QUA8 ;**
 quadrangle à 8 nœuds, face de PY13, PR15 ou CU20
 cotés courbes
 1 degré de liberté par nœuds T
 interpolation parabolique
- L'élément LIA3 **OPTI DIME 3 MODE TRID ELEM LIA3 ;**
 raccord à 2x3 nœuds, connexion entre faces TRI3 de TET4, PYR5, PRI6
 1 degré de liberté par nœuds T
 interpolation linéaire
- L'élément LIA4 **OPTI DIME 3 MODE TRID ELEM LIA4 ;**
 raccord à 2x4 nœuds, connexion entre faces QUA4 de PYR5, PRI6, CUB8
 1 degré de liberté par nœuds T
 interpolation linéaire

L'élément LIA6 **OPTI DIME 3 MODE TRID ELEM LIA6 ;**
raccord à 2x6 nœuds, connexion entre faces TRI6 de TE10, PY13, PR15
1 degré de liberté par nœuds T
interpolation linéaire

L'élément LIA8 **OPTI DIME 3 MODE TRID ELEM LIA8 ;**
raccord à 2x8 nœuds, connexion entre faces QUA8 de PY13, PR15, CU20
1 degré de liberté par nœuds T
interpolation linéaire

9. MATERIAUX EN THERMIQUE

9.1 MATERIAUX ISOTROPES

Le matériau est appliqué sur un MMODEL. La forme la plus simple est (si MO1 est le MMODEL en question)

MA1 = **MATE** MO1 **K** λ ('C' cp) (**RHO** ρ) (CARA car) ;

L'écriture C au lieu de 'C' créé un conflit avec l'alias C de l'opérateur CERCle.

λ représente le coefficient de conductibilité (composante K),

ρ représente la masse volumique (optionnel) (composante RHO),

cp représente la chaleur spécifique (optionnel) (composante C).

Les coefficients peuvent être de type FLOTTANT, EVOLUTION (variable en fonction d'un paramètre par exemple la température) ou MCHAML (variable en fonction de la géométrie).

CARA car représente les caractéristiques géométriques (si nécessaire) (composantes cara):

SECT sect (sections pour les éléments de barre)

EPAI ep (épaisseurs pour les éléments de "coques")

Ces données concernant les caractéristiques géométriques peuvent aussi être fournies à l'aide de l'opérateur **CARActéristique**.

CA1 = **CARA** MO1 CARA car ;

à laquelle il faut souvent ajouter (si MO2 est le MMODEL en question)

MA2 = **MATE** MO2 **H** h ;

h représente le coefficient d'échange par convection ou l'inverse de la résistance thermique (composante H).

La loi de Fourier s'écrit dans le cas isotrope (\dot{T}_i signifie $\frac{\partial T}{\partial x_i}$) en tridimensionnel

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K & & \\ 0 & K & \\ 0 & 0 & K \end{bmatrix} \text{Sym} \begin{bmatrix} \dot{T}_x \\ \dot{T}_y \\ \dot{T}_z \end{bmatrix} = q$$

9.2 MATERIAUX ORTHOTROPES

Le repère d'orthotropie est fourni par l'option **DIREction** ou **RADial**. Le principe est de se fixer une direction donnée puis de décrire le repère par rapport à cette direction.

La loi de Fourier s'écrit dans le cas orthotrope (\dot{T}_i signifie $\frac{\partial T}{\partial x_i}$) en tridimensionnel

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} & \frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial x_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1 & 0 & 0 \\ \cdot & K_2 & 0 \\ \text{sym} & \cdot & K_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \\ \dot{T}_3 \end{bmatrix} = q$$

Les caractéristiques sont fournies dans le repère d'orthotropie. La rotation vers le repère général (ou local) de calcul est faite par le programme.

Soit a_1, a_2, a_3 les cosinus directeurs du premier axe du second repère dans le premier repère.

Soit b_1, b_2, b_3 les cosinus directeurs du deuxième axe du second repère dans le premier repère.

Soit c_1, c_2, c_3 les cosinus directeurs du troisième axe du second repère dans le premier repère.

La formule de transformation permettant de passer du second repère (') vers le premier est :

a) Coques

Les caractéristiques thermiques à fournir sont

K1, K2, K3 coefficients de conductibilité

RHO masse volumique

C chaleur massique

La direction est fournie par

DIRE P1 (ou **RADI P1**) **PARA** (ou **PERP** ou (**INCL ang (P3)**))

On rappelle qu'il faut aussi fournir l'épaisseur

EPAI épaisseur

b) Massifs bidimensionnels

Les caractéristiques thermiques à fournir sont

K1, K2 coefficients de conductibilité

RHO masse volumique

C chaleur massique

c) Massifs tridimensionnels

Les caractéristiques thermiques à fournir sont

K1, K2, K3 coefficients de conductibilité

RHO masse volumique

C chaleur massique

9.3 MATERIAUX ANISOTROPES

Le repère d'anisotropie est fourni par l'option **DIREction**, ou **RADial**. Le principe est de se fixer une direction donnée puis de décrire le repère par rapport à cette direction.

La loi de Fourier s'écrit dans le cas anisotrope (\dot{T}_i signifie $\frac{\partial T}{\partial x_i}$) en tridimensionnel

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} & \frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial x_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{11} & K_{21} & K_{31} \\ \cdot & K_{22} & K_{32} \\ \text{sym} & \cdot & K_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \\ \dot{T}_3 \end{bmatrix} = q$$

Les caractéristiques sont fournies dans le repère d'anisotropie. La rotation vers le repère général (ou local) de calcul est faite par le programme.

Soit a_1, a_2, a_3 les cosinus directeurs du premier axe du second repère dans le premier repère.

Soit b_1, b_2, b_3 les cosinus directeurs du deuxième axe du second repère dans le premier repère.

Soit c_1, c_2, c_3 les cosinus directeurs du troisième axe du second repère dans le premier repère.

La formule de transformation permettant de passer du second repère (') vers le premier est :

a) Massifs bidimensionnels

Les caractéristiques thermiques à fournir sont

K11, K21, K22 coefficients de conductibilité

RHO masse volumique

C chaleur massique

b) Massifs tridimensionnels

Les caractéristiques thermiques à fournir sont

K11, K21, K22, K31, K32, K33 coefficients de conductibilité

RHO masse volumique

C chaleur massique

9.4 MATERIAUX NON LINEAIRES

Par matériau non linéaire, on entend toute caractéristique thermique dépendant de la température y compris les coefficients de convection. Pour plus d'informations, voir les chapitres non linéaires (pages 50 à 55).

Dans le cas où la conductivité (par exemple mais ce serait pareil pour C et H) dépend de la température, il suffit de faire

evk = **EVOL MANU T** prt **K** prk ;

prt LISTREEL - liste des températures construite par PROGRESSION

prk LISTREEL - liste des conductivités construite par PROGRESSION

MAC = MOC **MATE K** evk ;

9.5 MATERIAUX CONVECTION

On distingue comme on l'a vu dans le chapitre MODELE, les éléments massifs et les éléments coques. Ces derniers sont caractérisés par leur épaisseur et un sens de parcours qui oriente la normale à l'élément (à ce sujet, on se reportera au volume Maillage et Description du Langage). Conventionnellement la normale est orientée de la face inférieure vers la face supérieure. Il peut y avoir plusieurs échanges sur une face, dans ce cas on mettra le mot CONStituant, sur le MMODEL.

a) Cas CONVECTION

Il faut fournir **H**,

b) Cas CONVECTION SUPERIEURE

Il faut fournir **H**

c) Cas CONVECTION INFERIEURE

Il faut fournir **H**

9.6 MATERIAUX RAYONNEMENT

On distingue comme on l'a vu dans le chapitre MODELE, les éléments massifs et les éléments coques. Ces derniers sont caractérisés par leur épaisseur et un sens de parcours qui oriente la normale à l'élément (à ce sujet, on se reportera au volume Maillage et Description du Langage). Conventionnellement la normale est orientée de la face inférieure vers la face supérieure.

Premier pas non linéaire

La seconde syntaxe du modèle permet d'imposer une émissivité.

MA3 = MATE MO3 **EMIS** ϵ ; (ou **EINF** ϵ_{inf} ou/et **ESUP** ϵ_{sup} dans le cas des coques)

ϵ représente l'émissivité dans la relation $\Phi = \sigma \epsilon (T_e^4 - T^4)$ (composante **EMIS**, **EINF** ou **ESUP**).

Il faut fournir **EMIS** dans le cas des massifs et **ESUP** ou/et **EINF** dans le cas des coques, mais c'est déjà un matériau non linéaire.

10. CONDITIONS AUX LIMITES THERMIQUES

Tous les opérateurs créent un objet de type RIGIDITE de sous-type CONDUCTIVITE ou BLOCAGE.

BLOQuer

Conditions de blocage unilatéral ou bilatéral sur un objet de type POINT ou MAILLAGE. Crée un objet de type RIGIDITE à assembler (**ET**) avec la conductivité globale. L'opérateur **DEPI**posé est obligatoire si la température imposée est non nulle.

Cas bilatéral: On impose la valeur (fournie dans **DEPI**posé) des températures de mail: $T = \text{valeur}$

TI = **BLOQ** mot MAIB ;

mot MOT valant **T** (ou **TSUP** ou **TINF**)
MAIB MAILLAGE

Cas unilatéral: On impose une borne (fournie dans **DEPI**posé) aux températures de mail: $T < \text{valeur (MAXI)}$ ou $T > \text{valeur (MINI)}$

RCL2 = **BLOQ (MINI ou MAXI)** mot maib ;

mot MOT valant **T** (ou **TSUP** ou **TINF**)
MAIB MAILLAGE

(voir *REL*ation, *DEPI*posé)

CONDuctivité

Conditions aux limites de convection (partie hT). L'opérateur **CONV**ection est obligatoire même si la température extérieure est nulle.

RCL1 = **COND** MA1 MO1 ;

MA1 MCHAML (composante H)
MO1 MMODEL

(voir *CONV*ection, *MATE*riau, *MODE*le)

RELation

Relations linéaires unilatérale ou bilatérale entre températures. Crée un objet de type RIGIDITE à assembler (**ET**) avec la conductivité globale. L'opérateur **DEPI**posé est obligatoire si la température imposée est non nulle. On impose la valeur (fournie dans **DEPI**posé) de la relation : $\Sigma(\text{coef}_i T_i) = \text{valeur}$

Cas bilatéral: On impose la valeur (fournie dans **DEPI**posé) de la relation: $\Sigma(\text{coef}_i T_i) = \text{valeur}$

RCL2 = **RELA** coef1 ddl1 mail1 +ou- coef2 ddl2 mail2 ;

Cas unilatéral: On impose une borne (fournie dans **DEPI**posé) à la relation: $\Sigma(\text{coef}_i T_i) < \text{valeur (MAXI)}$ ou $\Sigma(\text{coef}_i T_i) > \text{valeur (MINI)}$

RCL3 = **RELA (MINI ou MAXI)** coef1 ddl1 mail1 +ou- coef2 ddl2 mail2 ... ;

ddli MOT valant **T** (ou **TSUP** ou **TINF**)
coefi FLOTTANT
maili MAILLAGE ou POINT

Il doit y avoir le même nombre de nœuds dans tous les mail. La relation est imposée nœud par nœud. ddli représente T ou TINF ou TSUP. Cet opérateur permet aussi d'assurer la liaison coque-massif par relation entre TSUP et TINF d'un coté et T de l'autre.

(voir BLOQuer, DEPImposé)

Pour un problème de thermique, la relation de symétrie qui s'écrit $\Phi = 0$ est implicite (dans une formulation déplacement). Elle est équivalente à

FF = **FLUX** MO1 0. MAIL1 ;

(voir chargement page 36)

11. CHARGEMENTS THERMIQUES

Tous les opérateurs créent un objet de type CHPOINT dont les composantes sont Q et éventuellement QSUP et QINF, sauf MANU où l'on fournit le nom de la composante qui doit prendre l'une de ces trois valeurs. On peut changer le nom de(s) la composante(s) avec l'opérateur NOMC.

Note sur la NATURE des CHPOINT (en thermique):

- Il y a trois NATURE possibles: INDETERMINE, DIFFUS, DISCRET.
- Les CHPOINT INDETERMINE sont créés par MANU CHPO, PSCA, toutes les fonctions élémentaires (voir le volume Langage et Maillage).
- Les CHPOINT DIFFUS sont créés par CHAN CHPO (voir le volume Post-Traitements), CHPO, COOR, (MANU CHPO), RESO.
- Les CHPOINT DISCRET sont créés par CONV, DEPI, FLUX, (MANU CHPO), REAC (voir le volume Post-Traitements), RESU (voir le volume Post-Traitements ou le volume Vérification des Données), SOUR.
- On peut changer la NATURE d'un CHPOINT avec l'opérateur CHAN ATTR.
- On ne peut assembler par ET que des CHPOINT de même NATURE (DISCRET ou DIFFUS).
- L'assemblage de CHPOINT DISCRET est additive. C'est un CHPOINT DISCRET.
- L'assemblage de CHPOINT DIFFUS n'est possible que si les valeurs aux nœuds communs sont les mêmes. C'est un CHPOINT DIFFUS.
- Exemple simple d'assemblage

Soit le maillage MT formé de M1 (QUA4) et M2 (COQ2) qui ont un point commun. On veut imposer la même source ponctuelle sur tous les points ce qui ne résout pas le problème de la relation entre TSUP, TINF et T. Sur les sept solutions proposées, trois permettent d'obtenir le résultat escompté, une fournit un résultat inattendu et trois se terminent par un message d'erreur. Aux QSUP et QINF près, ces remarques sont valables si M2 est formé aussi de QUA4.

- 1) C1 = MANU CHPO 1 M1 Q 10 ;
C2 = MANU CHPO 3 M2 Q 10 QSUP 10 QINF 10 ;
CT = C1 et C2 ;

Cette opération est illicite car les CHPOINT sont de nature INDETERMINE

- 2) C1 = MANU CHPO 1 M1 Q 10 NATURE DISCRET ;
C2 = MANU CHPO 3 M2 Q 10 QSUP 10 QINF 10 ;
CT = C1 et C2 ;

Cette opération est illicite car les CHPOINT sont de nature différente

- 3) C1 = MANU CHPO 1 M1 Q 10 NATURE DISCRET ;
C2 = MANU CHPO 3 M2 Q 10 QSUP 10 QINF 10 NATURE DISCRET ;
CT = C1 et C2 ;

La valeur de Q au point commun est 20

- 4) C1 = MANU CHPO 1 M1 Q 10 NATURE DIFFUS ;
C2 = MANU CHPO 3 M2 Q 10 QSUP 10 QINF 10 NATURE DIFFUS ;
CT = C1 et C2 ;

La valeur de Q au point commun est 10

- 5) C1 = MANU CHPO 1 M1 Q 20 NATURE DIFFUS ;
C2 = MANU CHPO 3 M2 Q 10 QSUP 10 QINF 10 NATURE
DIFFUS ;
CT = C1 et C2 ;

Cette opération est illicite car les CHPOINT prennent 2 valeurs différentes au point commun

- 6) C1 = MANU CHPO 1 MT Q 10 NATURE DISCRET (ou DIFFUS) ;
C2 = MANU CHPO 2 M2 QSUP 10 QINF 10 NATURE DISCRET
(ou DIFFUS) ;
CT = C1 et C2 ;

La valeur de Q au point commun est 10

• Une opération (+ ou -) entre deux CHPOINT est toujours possible et obéit à des règles particulières indépendantes de leur NATURE. Toutefois, si leur NATURE est différente, le résultat est INDETERMINE.

• S'ils ont le même support et les mêmes composantes, celles-ci sont additionnées ou soustraites.

• Dans le cas contraire, les deux CHPOINT sont assemblés au sens DISCRET.

• Si l'on reprend l'exemple précédent en remplaçant « et » par « + », seul le cas 6 quelle que soit la NATURE fournit le résultat attendu, tous les autres fournissent un résultat inattendu.

• Une multiplication (*) entre deux CHPOINT n'est possible que si l'un des deux a une seule composante de nom SCAL.

• Une division (/) entre deux CHPOINT n'est possible que si l'un des deux (qui devient de fait automatiquement le diviseur) a une seule composante de nom SCAL.

• L'addition, la soustraction (elle n'est pas commutative), la multiplication, la puissance ou la division (+, -, *, **, /) d'un CHPOINT avec ou par un FLOTTANT affecte toutes les composantes sans changer leur nom et ne change pas la NATURE.

• La combinaison linéaire de CHPOINT (COLI) obéit aux mêmes règles que l'addition (+).

CONvection

Calcul d'échanges convectifs de type $\Phi = h (T_e - T)$. Ici on calcule la partie $h T_e$. Si l'on omet cet opérateur, la température extérieure est nulle dans l'unité choisie.

FCO = CONV MA MO T valeur ;

MA MCHAML de matériau (composante H)

MO MMODEL de convection

valeur FLOTTANT représentant la valeur imposée (à la place de T valeur, on peut mettre un CHPOINT de composante T)

FCO CHPOINT de nature DISCRET

Permet aussi de fournir T_e pour les modèles de rayonnement mais on peut aussi utiliser MANUel.

(voir CONductivité pour la partie hT, MATÉriau, MODEle)

DEPImposé

Valeurs imposées d'une température. Est relatif à un objet RIGIDITE créé par

BLOQUer ou RELATION. A ne pas confondre avec la directive de maillage DEPLacer.

FI = **DEPI RIB** valeur ;

RIB RIGIDITE (sous type BLOCAGE)

valeur FLOTTANT représentant la valeur imposée

CHPOINT - dans ce cas les composantes du CHPOINT doivent coïncider avec celles fournies dans BLOQ ou RELA. Au besoin, on utilisera l'opérateur NOMC.

FI CHPOINT de nature DISCRET

(voir BLOQUer, MANUel, RELATION)

FLUX

Valeurs nodales équivalentes à un flux surfacique

FF = **FLUX MO1** flux MAI1 (**DIREction V1**) (MOT) ;

MO1 MMODEL

flux valeur du flux (positif s'il entre dans MO1)

MAI1 MAILLAGE (représentant la surface soumise au flux)

DIRE Direction du flux (par défaut normale à MAI1)

MOT **SUPERieur** ou **INFERieur** pour les éléments coques

FF CHPOINT de nature DISCRET

MANUel

Crée par défaut un CHPOINT de nature INDETERMINE

• Valeurs nodales d'une source ponctuelle.

FP = **MANU CHPO MAIS 1 Q** q **NATURE DISCRET** ;

MAIS MAILLAGE (représentant les points du solide où la source q est imposée)

FP = **MANU CHPO MAIC 3 Q** q **QSUP** qs **QINF** qi **NATURE DISCRET** ;

MAIC MAILLAGE (représentant les points des coques où la source q est imposée)

• Température extérieure pour la convection (dans le cas PASAPAS)

FP = **MANU CHPO MAIS 1 T** T_{ext} **NATURE DISCRET** ;

MAIS MAILLAGE (représentant les points où la condition est imposée)

On peut aussi mettre TSUP et/ou TINF dans le cas des éléments coques.

• Températures pour un CHPOINT initial

FP = **MANU CHPO MAIS 1 T T** **NATURE DIFFUS** ;

MAIS MAILLAGE (représentant les points du solide où la température T est imposée)

FP = **MANU CHPO MAIC 3 T T** **TSUP** Ts **TINF** Ti **NATURE DIFFUS** ;

MAIC MAILLAGE (représentant les points de coques où la température T est imposée)

• Températures pour un CHPOINT imposé

FP = **MANU CHPO MAIS i compi v** **NATURE DISCRET** ;

MAIT MAILLAGE (représentant les points où la(les) composante(s) compi est(sont) imposée(s))

i ENTIER nombre de composantes concernées

compi MOT nom des composantes à choisir entre T, TINF, TSUP

v FLOTTANT valeur de la composante

(voir *CHARgement, DEPImposé, PASAPAS*)

SOURce

Valeurs nodales équivalentes à une source volumique

FS = **SOUR** MO1 source MAI1 (MA) ;

MO1 MMODEL

source valeur de la source (elle peut être positive -apport- ou négative -puits-)

FLOTTANT ou CHPOINT à une ou trois composantes

MAI1 MAILLAGE (représentant la partie soumise à la source)

MA MCHAML (composante cara)

FS CHPOINT de nature DISCRET

12. RESOLUTION EN THERMIQUE (REGIME PERMANENT)

CAPAcité

Calcul des matrices de capacité. La forme la plus simple est (si MA représente l'ensemble des matériaux - on a besoin de ρ , de c_p et éventuellement des caractéristiques géométriques - et MO l'ensemble des modèles)

CAIT = CAPA MA MO ;

MA MCHAML de matériau (composantes C, RHO et cara)

MO MMODEL

CONDUCTivité

Calcul des matrices de conductibilité. Ceci est valable pour les éléments de conduction (on a besoin de λ et éventuellement des caractéristiques géométriques), les résistances thermiques (on a besoin de h) et les éléments de convection (on a besoin de h). La forme la plus simple est (si MA représente l'ensemble des matériaux et MO l'ensemble des modèles)

COIT = COND MA MO ;

MA MCHAML de matériau (composantes K et cara ou H)

MO MMODEL

(voir CONvection)

ET

Assemblage des RIGIDITE créées par BLOQuer, MANUel, RELAtion, CONDUCTivité.

Assemblage des CHPOINT de même nature créés par CONvection, DEPImposé, FLUX, MANUel, SOURce

Assemblage des MASSE créées par LUMPer, MANUel, CAPAcité.

LUMPer

Sommation des lignes de la matrice CRHO sur la diagonale. Souvent nécessaire en transitoire mais attention aux éléments à interpolation quadratique (voir page 86).

ML = LUMP MIT ;

Attention : La diagonalisation effectuée par CASTEM2000[®] correspond à sommer les termes d'une ligne sur la diagonale. Ce qui revient à l'opération suivante :

$$C_{ii} = \sum_j \int \rho C_p N_i N_j dV \text{ et } C_{ij} = 0 \text{ pour } j \neq i$$

En conséquence pour les éléments à interpolation parabolique cela peut engendrer quelques problèmes :

TRI6 les termes correspondants aux sommets sont nuls

QUA8 les termes correspondants aux sommets sont négatifs

TE10 les termes correspondants aux sommets sont négatifs

PY13 les termes correspondants aux sommets sont négatifs

PR15 les termes correspondants aux sommets sont négatifs

CU20 les termes correspondants aux sommets sont négatifs

Pour éviter ce problème, on peut envisager d'autres types de diagonalisation du genre

$$C_{ii} = \alpha \int \rho C_p N_i^2 dV \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{\int \rho C_p dV}{\sum_j \int \rho C_p N_j^2 dV}$$

que l'on peut effectuer de la façon suivante

Si toutes les caractéristiques sont constantes, cela revient à pondérer chaque terme diagonal de la matrice consistante par la somme des termes diagonaux et à annuler les termes extradiagonaux.

(voir CAPAcité)

RESolution

Résolution de l'équation $K T = Q$. La syntaxe est (si COT représente l'ensemble des conductibilités/convections et QT l'ensemble des chargements).

TT = **RESO** COT QT (**GRAD**);

COT RIGIDITE (sous type CONDUCTIVITE)

QT CHPOINT de sources (composantes Q, QSUP, QINF). Sa nature est indifférente.

TT CHPOINT de nature DIFFUS (composantes T, TSUP, TINF).

La résolution peut être faite avec une méthode itérative de type gradient conjugué (méthode de Crout)

SUPER élément

Lors d'un calcul par super-éléments, il y a cinq étapes principales qui font appel à des opérateurs différents :

Construction des super éléments	SUPER RIGIdité
Construction des super charges	SUPER CHARge
Assemblage des éléments/super éléments	EXTRAire et ET
Résolution du système assemblé	RESolution
Retour dans les super-éléments	SUPER DEPLacement

(voir la partie spécifique page 44)

13. EXEMPLES PERMANENTS LINEAIRES THERMIQUES

13.1 EXEMPLE DE BASE

Opérateurs utilisés : **BLO**qué, **CON**duction, **CON**vection, **DEP**Imposé, **ET**, **FLUX**, **MAN**uel, **MATE**riau, **MODE**, **RELA**tion, **RES**olution, **SOUR**ce.

On suppose que le maillage est construit tant pour la conduction que pour les conditions aux limites de convection et que pour toute sorte de chargements.

1^{ère} étape

Définir le (les) modèle(s)

- pour la conduction

MOC = MAIC **MODE THERMIQUE ISOTROPE** ;

- pour la convection ou les résistances thermiques

MOE = MAIE **MODE CONVECTION (INFERIEUR ou SUPERIEUR)** ;

2^{ème} étape

Définir le (les) matériau(x)

- pour la conduction (le FLOTTANT k, conductibilité, peut être variable en fonction de la géométrie, dans ce cas c'est un MCHAML).

MAC = MOC **MATE K** k ;

- pour la convection ou les résistances thermiques (le FLOTTANT h, coefficient d'échange ou conductance, peut être variable en fonction de la géométrie, dans ce cas c'est un MCHAML).

MAE = MOE **MATE H** h ;

Si un coefficient (H ou K) varie avec la géométrie, il faut construire un CHPOINT

vérifier que le nom de la composante (H ou K) est le bon
sinon utiliser **NOM**Composante

transformer en MCHAML avec **CHAN CHAM**

3^{ème} étape

Calculer les matrices de conduction pour la conduction et les résistances thermiques

CAC = **COND** MA MO ;

4^{ème} étape

Définir les conditions aux limites

- convection

LAC = **COND** MAE MOE ;

- températures imposées

LAT = **BLOQ** T MAIM (TSUP MASU ou TINF MAIN) ;

- relations entre températures

LAR = **RELA** ...;

5^{ème} étape

Définir les chargements

- convection

CAC = **CONV** MAE MOE **T** TEXT ;

le FLOTTANT TEXT, température extérieure, peut dépendre de la géométrie, dans ce cas c'est un CHPOINT. On ne fait pas cette opération pour les résistances thermiques.

- flux imposés

CAF = **FLUX** MOF Φ (MAF) ;

le FLOTTANT Φ , flux surfacique, peut dépendre de la géométrie, dans ce cas c'est un CHPOINT (dans ce cas, on ne met pas le MAILLAGE).

Rappel : la condition de flux nul (ou de symétrie) est implicite.

- sources volumiques imposées

CAS = **SOUR** MOS q (MAS) ;

le FLOTTANT q, source volumique, peut dépendre de la géométrie, dans ce cas c'est un CHPOINT (dans ce cas, on ne met pas le MAILLAGE).

- températures imposées

CAT = **DEPI** LAT θ ;

le FLOTTANT θ , température imposée, peut dépendre de la géométrie, dans ce cas c'est un CHPOINT.

- sources ponctuelles imposées

CAP = **MANU** **CHPO** MAP 1 Q q **NATURE DISCRET** ;

le FLOTTANT q, source ponctuelle imposée.

6^{ème} étape

Assemblage par **ET**

des conductions et conditions aux limites CTOT

des chargements QTOT

7^{ème} étape

Résolution du système linéaire

TT = **RESO** CTOT QTOT ;

13.2 UTILISATION DES SUPER-ELEMENTS

Opérateurs utilisés : *BLOQué, CONduction, CONvection, DEPIposé, ET, FLUX, MANUel, MATÉriau, MODE, RELation, RESOlution, SOURce, SUPER.*

On suppose que le maillage est construit tant pour la conduction que pour les conditions aux limites de convection et que pour toute sorte de chargements ainsi que pour les nœuds maîtres.

1^{ère} étape

Définir le (les) modèle(s)

- pour la conduction

MOC = MAIC **MODE THERMIQUE ISOTROPE** ;

- pour la convection ou les résistances thermiques

MOE = MAIE **MODE CONVECTION (INFERIEUR ou SUPERIEUR)** ;

2^{ème} étape

Définir le (les) matériau(x)

- pour la conduction (le FLOTTANT k, conductibilité, peut être variable en fonction de la géométrie, dans ce cas c'est un MCHAML).

MAC = MOC **MATE K** k ;

- pour la convection ou les résistances thermiques (le FLOTTANT h, coefficient d'échange ou conductance, peut être variable en fonction de la géométrie, dans ce cas c'est un MCHAML).

MAE = MOE **MATE H** h ;

Si un coefficient (H ou K) varie avec la géométrie, il faut construire un CHPOINT

vérifier que le nom de la composante (H ou K) est le bon

sinon utiliser **NOM**Composante

transformer en MCHAML avec **CHAN CHAM**

3^{ème} étape

Calculer les matrices de conduction pour la conduction et les résistances thermiques

CAC = **COND** MA MO ;

4^{ème} étape

Définir les conditions aux limites

- convection

LAC = **COND** MAE MOE ;

- températures imposées

LAT = **BLOQ** T MAIM (TSUP MASU ou **TINF** MAIN) ;

- relations entre températures

LAR = **RELA** ...;

5^{ème} étape

Définir les chargements

- convection

CAC = **CONV** MAE MOE T TEXT ;

le FLOTTANT TEXT, température extérieure, peut dépendre de la géométrie, dans ce cas c'est un CHPOINT

- flux imposés

$$\text{CAF} = \mathbf{FLUX MOF \Phi (MAF)} ;$$

le FLOTTANT Φ , flux surfacique, peut dépendre de la géométrie, dans ce cas c'est un CHPOINT (dans ce cas, on ne met pas le MAILLAGE).

Rappel : la condition de flux nul (ou de symétrie) est implicite.

- sources volumiques imposées

$$\text{CAS} = \mathbf{SOUR MOS q (MAS)} ;$$

le FLOTTANT q , source volumique, peut dépendre de la géométrie, dans ce cas c'est un CHPOINT (dans ce cas, on ne met pas le MAILLAGE).

- températures imposées

$$\text{CAT} = \mathbf{DEPI LAT \theta} ;$$

le FLOTTANT θ , température imposée, peut dépendre de la géométrie, dans ce cas c'est un CHPOINT.

- sources ponctuelles imposées

$$\text{CAP} = \mathbf{MANU CHPO MAP 1 Q q NATURE DISC} ;$$

le FLOTTANT q , source ponctuelle imposée.

6^{ème} étape

Assemblage par **ET**

des conductions et conditions aux limites CTOT1

(sauf celles sur les points maîtres BTM)

des chargements

QTOT1

7^{ème} étape

Condensation des conductivités sur les points maîtres

$$\text{CS} = \mathbf{SUPE RIGI CTOT1 MACAC} ;$$

8^{ème} étape

Condensation des chargements

$$\text{QS} = \mathbf{SUPE CHAR CS QTOT1} ;$$

9^{ème} étape

Extraction des conductivités

$$\text{CSEQ} = \mathbf{EXTR RIGI CS} ;$$

10^{ème} étape

Assemblage par **ET**

des conductions et conditions aux limites CTOT, CSEQ

des chargements

QTOT, QS

11^{ème} étape

Résolution du système linéaire

$$\text{TEQ} = \mathbf{RESO (CSEQ ET BTM) QS} ;$$

12^{ème} étape

Retour dans le super-élément

TT = **SUPE DEPL CS TEQ** ; *conditions aux limites*
KT1 = **EXTR CS RIGT** ; *conductivité totale*
TV1 = **RESO kt1 (tt ET qtot1)** ;

14. CALCULS PERMANENTS NON LINEAIRES THERMIQUES

lire d'abord le chapitre CALCULS THERMIQUES LINEAIRES

Le temps n'intervient pas explicitement mais tous les paramètres peuvent dépendre de T (conductivité $\lambda(T)$, convection $h(T)$, rayonnement, chargements ($Q(T)$, $\Phi(T)$)

CHARGement

Crée un objet de type CHARGEME.

CH1 = **CHAR** mot QT EV ;

ou CH2 = **CHAR** mot ta1 ta2 ;

mot MOT **Q**, **TE** ou **TIMP**

Q pour FLUX ou SOUR (ou par MANU), TE pour convection ou rayonnement (par MANU), TIMP pour DEPI.

QT CHPOINT de sources ou de températures.

EV EVOLUTIO

ta1 TABLE indicée par des entiers (à partir de 0) contenant les « temps » (FLOTTANT)

ta2 TABLE indicée par les mêmes entiers contenant les chargements (CHPOINT)

(voir EVOLution, CONvection, DEPIposé, FLUX, MANUel, SOURce)

DIMENSION

Permet d'obtenir la dimension d'une table. Utile pour post-traiter les calculs issus de PASAPAS.

NN = **DIME** TAB1.**TEMPS** ;

TAB1.**TEMPS** TABLE contenant les temps conservés par PASAPAS

En permanent non linéaire, NN peut valoir 2.

(voir opérateurs de post-traitement)

EVOLution

Définition des chargements

Définition des variations de coefficients

(voir CHARGement, MATERiau, PROGRESSION)

FFORMe

Calcul des facteurs de forme dans une cavité rayonnante. Il est appelé par PASAPAS. Plusieurs options sont a priori permises mêmes si dans PASAPAS standard, trois seulement sont utilisées. La cavité doit être décrite par une ligne (ou une surface) dont la normale est dirigée vers l'intérieur.

CF = **FFOR** mo ; *forme utilisée par PASAPAS*

CF = **FFOR** mo **CVXE** ; *forme utilisée par PASAPAS (indice CONVEXE=VRAI)*

CF = **FFOR** mo **SYME** p1 p2 (p3) ;

CF = **FFOR** mo **NNOR** ; *forme utilisée par PASAPAS (indice FERME=FAUX)*

CF = **FFOR** mo **ABSO** fa ;

mo MMODEL s'appuyant sur le MAILLAGE de la cavité
 CF MCHAML à deux composantes (SURF et MIDL)
 CVXE la cavité est convexe (par défaut elle est concave)
 SYME la cavité est symétrique (droite passant par p1, p2 en 2D, plan passant par p1, p2, p3 en 3D). Ne marche pas en axisymétrique. La droite (ou le plan) de symétrie ne doit pas être maillé.
 NNOR pour une cavité ouverte, on ne normalise pas CF.
 ABSO l'intérieur de la cavité a un coefficient d'absorption de fa (fournir un FLOTTANT négatif). Incompatible avec CVXE et SYME

(voir PASAPAS)

HRAYO

Permet de calculer le coefficient d'échange lors du rayonnement face à face

INDEX

(voir TABLE dans le volume langage et maillage)

MATERIAU

Le matériau de la procédure contient

- les termes issus de la convection (CONVECTION), du rayonnement (RAYONNEMENT) et de la conduction (THERMIQUE) avec 'C'=0. et RHO=0.

dans l'indice CARACTERISTIQUES de la table.

MODELE

Le modèle de la procédure contient

- les termes issus de la convection (CONVECTION) et de la conduction (THERMIQUE) dans l'indice MODELE de la table.
- les termes issus du rayonnement (RAYONNEMENT) dans l'indice RAYONNEMENT . i . MODELE de la table.

PASAPAS

Procédure de calculs non linéaires. Résolution de $K(T) T = Q(T)$.

PASAPAS TAB1 ;

TAB1 TABLE contenant les données et les résultats. Elle doit être déclarée comme telle avant utilisation.

TAB1 = **TABL ;**

Données

TAB1.**BLOCAGES_THERMIQUES**

conditions aux limites (RIGIDITE)

TAB1.**CARACTERISTIQUES**

matériaux (MCHAML) -
composantes **K, C(=0.),**
RHO(=0.), H,EMIS, ESUP,
EINF, SECT, EPI.

TAB1.**CHARGEMENT**

chargement (CHARGEME)

TAB1.**MODELE**

modèles (MMODEL)

TAB1.**PROCEDURE_THERMIQUE**

NONLINEAIRE

TAB1.**TEMPERATURES**

TABLE

TAB1.TEMPERATURES . 0	CHPOINT (températures initiales), pour initialiser les itérations (par défaut elles sont nulles ce qui est suffisant)
TAB1.TEMPS_CALCULES	pas calculés (LISTREEL)- par incrément entre 0 et 1 -
TAB1.TEMPS_SAUVES	pas sauvés en plus des pas initial et final -(facultatif, par défaut tous les pas calculés)
TAB1.CELSIUS	VRAI - calcul en °C FAUX - calcul en K (par défaut) <i>seulement s'il y a du rayonnement</i>
TAB1.RAYONNEMENT	TABLE
TAB1.RAYONNEMENT. i	TABLE (i représente le numéro de la frontière. Chaque frontière ne peut supporter qu'un CONStituant)
TAB1.RAYONNEMENT. i .TYPEMOT	(INFINI ou CAVITE)
TAB1.RAYONNEMENT. i .MODELE	MMODEL de la zone
TAB1.RAYONNEMENT. i .CONVEXE	LOGIQUE (dans le cas CAVITE)
TAB1.RAYONNEMENT. i .FERME	LOGIQUE (dans le cas CAVITE)
TAB1.RELAXATION_THETA	FLOTTANT (1.)
TAB1.SOUS_RELAXATION	FLOTTANT (1.)

Résultats

TAB1.TEMPERATURES	températures (TABLE de CHPOINT)
TAB1.TEMPS	temps sauvés (TABLE de LISTREEL)

(voir TABLE dans le chapitre langage et maillage)

15. EXEMPLES PERMANENTS NON LINEAIRES THERMIQUES

15.1 EXEMPLE DE BASE

Opérateurs utilisés : *BLO*qué, *CHARG*ement, *DEP*osé, *ET*, *EVOL*ution, *FLUX*, *MANU*el, *MATE*riau, *MODE*le, *PASAPAS*, *PROG*ression, *REL*ation, *SOUR*ce.

On suppose que le maillage est construit tant pour la conduction que pour les conditions aux limites de convection et que pour toute sorte de chargements.

1^{ère} étape

Définir le (les) modèle(s)

- pour la conduction

MOC = MAIC **MODE THERMIQUE ISOTROPE** ;

- pour la convection ou les résistances thermiques

MOE = MAIE **MODE CONVECTION (INFERIEUR ou SUPERIEUR)**

CONS MOCO ;

pour le rayonnement

MOR = MAIR **MODE RAYONNEMENT CONS MORA** ;

2^{ème} étape

Définir le (les) matériau(x)

• pour la conduction (le FLOTTANT k, conductibilité, peut être variable en fonction de la géométrie, dans ce cas c'est un MCHAML - voir page 42).

MAC = MOC **MATE K k 'C' 0. RHO 0.** ;

Dans le cas où la conductivité dépend de la température, il suffit de faire

evk = **EVOL MANU T prt K prk** ;

prt LISTREEL - liste des températures construite par PROGression

prk LISTREEL - liste des conductivités construite par PROGression

MAC = MOC **MATE K evk 'C' 0. RHO 0.** ;

• pour la convection ou les résistances thermiques (le FLOTTANT h, coefficient d'échange ou conductance, peut être variable en fonction de la géométrie, dans ce cas c'est un MCHAML).

MAE = MOE **MATE H h** ;

Dans le cas où le coefficient d'échange dépend de la température, il suffit de faire

evh = **EVOL MANU T prt H prh** ;

prt LISTREEL - liste des températures

prh LISTREEL - liste des coefficients d'échange

MAE = MOE **MATE H evh** ;

- pour le rayonnement

MAR = MOR **MATE EMIS ε (ESUP ε_{sup}) (EINF ε_{inf})** ;

Si un coefficient (H ou K) varie avec la géométrie, il faut

construire un CHPOINT

vérifier que le nom de la composante (H ou K ou EMIS ou ESUP ou EINF) est

le bon sinon utiliser **NOM**Composante

transformer en MCHAML avec **CHAN CHAM**

3^{ème} étape

Définir les conditions aux limites

- températures imposées
LAT = **BLOQ T** MAIM (**TSUP** MASU ou **TINF** MAIN) ;
- relations entre températures
LAR = **RELA** ...;

4^{ème} étape

Définir les chargements

- convection (y compris résistances thermiques : dans ce cas mettre TEXT=0)
CAC = **MANU CHPO** MAE 1 T TEXT NATURE DISCRET;
- rayonnement
CAC = **MANU CHPO** MAE 1 T TEXT NATURE DISCRET;
- flux imposés
CAF = **FLUX** MOF Φ (MAF) ;
le FLOTTANT Φ , flux surfacique, peut dépendre de la géométrie, dans ce cas c'est un CHPOINT (dans ce cas, on ne met pas le MAILLAGE).
Rappel : la condition de flux nul (ou de symétrie) est implicite.
- sources volumiques imposées
CAS = **SOUR** MOS q (MAS) ;
le FLOTTANT q, source volumique, peut dépendre de la géométrie, dans ce cas c'est un CHPOINT (dans ce cas, on ne met pas le MAILLAGE).
- températures imposées
CAT = **DEPI** LAT θ ;
le FLOTTANT θ , température imposée, peut dépendre de la géométrie, dans ce cas c'est un CHPOINT.
- sources ponctuelles imposées
CAP = **MANU CHPO** MAP 1 Q q NATURE DISCRET;
le FLOTTANT q, source ponctuelle imposée.

5^{ème} étape

Définir les chargements. Pour chacun, définir abscisse, ordonnée, fonction puis chargement. Les chargements peuvent être découpés en incrément si, par exemple il y a des problèmes de convergence.

XX = **PROG** ...;

YY = **PROG** ...;

EVI = **EVOL** MANU abs XX ord YY ;

CHS = **CHAR Q** EVI CAS ; (source ou flux)

CHC = **CHAR TE** EVI CAC ; (convection ou rayonnement)

CHT = **CHAR TIMP** EVI CAT ; (température imposée)

6^{ème} étape

Remplir les indices de la table.

TA1 = **TABL** ;

TA1 . **MODELE**= MOC ET MOE ; (MODE)

TA1 . **CELSIUS**= **VRAI** (ou **FAUX**) ;

15.2 APPROCHE DE LA CONVECTION

a) Rappel sur la Convection Forcée

Le flux convectif s'écrit $\Phi = \int_S h(T)(T_{EXT} - T)dS$ avec $h(T)$ fourni par la formule :

$$Nu = \frac{h(T)L}{\lambda} = A Re^m Pr^n$$

avec Nu Nombre de Nusselt

$$Pr \quad \text{Nombre de Prandtl} \quad Pr = \frac{\mu C_P}{\lambda}$$

$$Re \quad \text{Nombre de Reynolds} \quad Re = \frac{\rho UL}{\mu}$$

A,m,n Constantes dépendant de la géométrie et du fluide

Dans CASTEM2000[®], le terme « $h(T)T$ » est pris en compte dans l'opérateur **CONduction**, et le terme « $h(T)T_{EXT}$ » par l'opérateur **CONvection** ou **CHARGement**. Dans la suite on verra un exemple particulier pour prendre en compte $h(T)$. Si h est constant, on est ramené à un problème linéaire (voir le chapitre correspondant page 36).

b) La Convection Naturelle

On parle de convection naturelle si $Gr*Pr > 1000$. Le flux convectif s'écrit de la même manière, avec $h(T)$ fourni par la formule :

$$Nu = \frac{h(T)L}{\lambda} = C(Gr Pr)^n$$

avec Nu Nombre de Nusselt

$$Pr \quad \text{Nombre de Prandtl} \quad Pr = \frac{\mu C_P}{\lambda}$$

$$Gr \quad \text{Nombre de Grashof} \quad Gr = \frac{L^3 \rho^2 g \beta \Delta T}{\mu^2}$$

C,n Constantes dépendant de la géométrie et du fluide

On peut donc écrire $h(T) = h_0(T)(T_{EXT} - T)^n$

$$\text{avec } h_0(T) = \frac{C\lambda}{L} \left(\frac{C_P L^3 \rho^2 g \beta}{\lambda \mu} \right)^n$$

On peut donc écrire le flux sous la forme

$$\Phi = \int_S h_0(T)(T_{EXT} - T)^{1+n} dS$$

c) Application : Prise en compte d'un coefficient h variable dans CASTEM2000®

Opérateurs utilisés : -, +, *, /, **, *ABSolu*, *CONduction*, *CONvection*, *EVOLution*, *INSEre*, *MATERiau*, *MODEle*, *PASAPAS*, *PROGression*, *REPEter*.

Le coefficient h(T) varie dans la plage T_{inf} , T_{sup} , suivant la formule $h_1 = h_0 * (T_{ext} - T)^n$. La plage est découpée en M intervalles. (Attention **H** est un mot réservé)

```

    définition de M, H0, N ≠ 0, TEXT
    DT = TSUP - TINF ;
    DT = DT / M ;
puis
    PT = PROG tinf PAS dt tsup ;
    PC = PROG (M + 1) * TEXT ;
    PH = ABS (PC - PT) ** N ;
    PH = H0 * PH ;
ou
    T0 = TINF ;
    i = 1 ;
    PT = PROG ;
    PH = PROG ;
    REPE B1 (M + 1) ;
        H1 =ABS ((TEXT - T0)) ** N ;
        h1 = h0 * h1 ;
        PT = INSE PT i T0 ;
        PH = INSE PH i h1 ;
        T0 = T0 + DT ;
        i = i + 1 ;
    FIN B1 ;
puis
    hev = EVOL MANU T PT H PH ;
    MO1 = MODE MAIL1 CONVECTION ;
    MA1 = MATE MO1 'H' hev ;
    FC = MANU CHPO MAIF 1 T text NATURE DISCRET ;
        définition de la variation de text en fonction du temps
    ev = EVOL MANU ... ;
    ch1 = CHAR TE FC EV ;
puis
    T1 = TABL ;
    ○○○
    T1 . PROCEDURE_THERMIQUE = NONLINEAIRE ;
    T1 . RELAXATION_THETA = 1. ;
    T1 . SOUS_RELAXATION = 1. ;
    T1 . TEMPS_CALCULES = PROG 1. ;
    T1 . TEMPERATURES = TABL ;
    T1 . TEMPERATURES 0. = MANU CHPO mail 1 T tin ; tin > text
    PASAPAS T1 ;
```

d) Calcul des bilans

Cette partie est développée dans le volume Post-Traitements. Néanmoins on remarquera que la seule formule du flux convectif permet d'obtenir le bilan.

Il suffit d'appliquer la formule qui se transforme dans le langage CASTEM2000® par :

$$\text{Bilan} = \text{Cond} * \text{Temp} - \text{Conv}$$

avec Cond opérateur COND avec composante H

 Temp opérateur RESO

 Conv opérateur CONV

et ceci sur n'importe quelle partie de la frontière.

15.3 LE RAYONNEMENT

Les températures sont écrites en K dans les formules. Dans les données CASTEM2000[®], cela dépend de l'indice CELSIUS.

a) Cas du milieu infini

$$\text{Le flux radiatif s'écrit } \Phi = \int_s \frac{\sigma \epsilon \epsilon_{\text{inf}}}{1 - (1 - \epsilon_{\text{inf}})(1 - \epsilon)} (T_{\text{EXT}}^4 - T^4) dS$$

Avec ϵ émissivité de la surface et ϵ_{inf} émissivité du milieu ambiant. Dans CASTEM2000[®], en particulier dans PASAPAS, on prend $\epsilon_{\text{inf}} = 1$. Dans le cas contraire, il faut modifier la valeur de ϵ .

Convection et rayonnement infini

On suppose que sur la frontière MAIF on a échange par convection et échange par rayonnement en milieu infini.

Opérateurs utilisés : **CHARGement**, **MANuel**, **MATERiau**, **MODEle**, **PASAPAS**.

```
mor = MODE MAIF RAYONNEMENT CONS moray ;
moc = MODE MAIF CONVECTION CONS mocon ;
mar = MATE mor EMIS  $\epsilon$  ;
mac = MATE moc H h ;
définition de la conduction
FC = MANU CHPO MAIF 1 T text NATURE DISCRET ;
définition de la variation de text en fonction du temps
ch1 = CHAR TE FC EV ;
TAB1 = TABL ;
TAB1 . CELSIUS = VRAI ;
TAB1 . MODELE = moc ; (et modèle de conduction)
TAB1 . CARACTERISTIQUES = mar et mac ; (et matériau de conduction)
TAB1 . CHARGEMENT = ch1 ; (et autres chargements)
TAB1 . RAYONNEMENT = TABL ;
TAB1 . RAYONNEMENT . 1 = TABL ;
      (Chaque frontière ne peut supporter qu'un CONStituant)
TAB1 . RAYONNEMENT . 1 . TYPE = INFINI ;
TAB1 . RAYONNEMENT . 1 . MODELE = mor ;
TAB1 . RELAXATION_THETA = 1. ;
TAB1 . SOUS_RELAXATION = 1. ;
TAB1 . TEMPS_CALCULES = PROG 1. ;
TAB1 . PROCEDURE_THERMIQUE = NONLINEAIRE ;
PASAPAS TAB1 ;
```

b) Cas du face à face

Le flux radiatif s'écrit $\Phi = \int_s \frac{\sigma \epsilon_1 \epsilon_2}{1 - (1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2)} (T_1^4 - T_2^4) dS$ que l'on peut écrire

$$\Phi = \int_s h(T)(T_1 - T_2) dS$$

avec $h(T) = \frac{\sigma \epsilon_1 \epsilon_2}{1 - (1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2)} (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)$

Prise en compte d'un coefficient h variable dans CASTEM2000®

Après la modification suivante à faire dans PASAPAS,

```

SI (EGA 'FACE' (ETAB.RAYONNEMENT.(&BOU_RA1).TYPE)) ;
  tb = EXTR (ETAB.RAYONNEMENT.(&BOU_RA1).MODELE) ZONE ;
  mr1 = tb . 1 ;
  emi1 = REDU (ETAB.CARACTERISTIQUES) mr1 ;
  mr2 = tb . 3 ;
  emi2 = REDU (ETAB.CARACTERISTIQUES) mr2 ;
  s1 = EXTR emi1 MAIL ;
  s2 = EXTR emi2 MAIL ;
  c12 = RACC s1 s2 .0001 ; On peut jouer sur la valeur du critère
  mc12 = MODE c12 CONVECTION ;
  s1p = CHAN s1 POI1 ;
  s2p = CHAN s2 POI1 ;
  n1 = NBEL s1p ;
  OPTI ELEM SEG2 ;
  i = 1 ;
  REPE bo1 n1 ;
    SI ( EGA i 1) ;
      rel12 = (s1 POIN i ) D 1 (s2 POIN i ) ;
      SINO ;
      rel12 = rel12 ET ((s1 POIN i ) D 1 (s2 POIN i )) ;
      FINS ;
      i = i + 1 ;
    FIN bo1 ;
  t1 = REDU ( EXCO T u_bou1 T) s1 ;
  t2 = REDU ( EXCO T u_bou1 T) s2 ;
  h12 = HRAYO mc12 mr1 emi1 t1 mr2 emi2 t2 rel12 CTE_SB ;
  mr12 = MATE mc12 H h12 ;
  MAT_RIGI = MAT_RIGI ET RIG_RAD ;
FINS ;

```

il faut mettre les indices suivants pour PASAPAS :

Soit LI et LS les MAILLAGE entre lesquels se fait le rayonnement. LI et LS doivent être identiques nœuds à nœuds.

```

  mri = MODE li RAYONNEMENT ;
  mari = MATE mri EMIS ε1 ;
  mrs = MODE ls RAYONNEMENT ;
  mars = MATE mrs EMIS ε2 ;
  TAB1 . MODELE = ; tous les modèles sauf le rayonnement

```

TAB1 . **CARACTERISTIQUES** = ; *tous les matériaux*
TAB1 . **CHARGEMENT** = ;
TAB1 . **RAYONNEMENT** = **TABL** ;
TAB1 . **RAYONNEMENT** . 1 = **TABL** ;
TAB1 . **RAYONNEMENT** . 1 . **TYPE** = **MOT 'FACE'** ;
TAB1 . **RAYONNEMENT** . 1 . **MODELE** = mri et mrs ;

c) Cas de la cavité

TAB1 . **RAYONNEMENT** = **TABL** ;
TAB1 . **RAYONNEMENT** . 1 = **TABL** ;
TAB1 . **RAYONNEMENT** . 1 . **TYPE** = **CAVITE** ;
TAB1 . **RAYONNEMENT** . 1 . **MODELE** = mor ;
TAB1 . **RAYONNEMENT** . 1 . **CONVEXE** = **VRAI** (ou **FAUX**) ;
TAB1 . **RAYONNEMENT** . 1 . **FERME** = **VRAI** (ou **FAUX**) ;
TAB1 . **RELAXATION_THETA** = **1.** ;
TAB1 . **SOUS_RELAXATION** = **1.** ;
TAB1 . **TEMPS_CALCULES** = **PROG 1.** ;

16. CALCULS TRANSITOIRES LINEAIRES THERMIQUES

lire d'abord le chapitre CALCULS THERMIQUES LINEAIRES

Le temps intervient explicitement et tous les paramètres sont indépendants de T.

CAPAcité

Calcul des matrices de capacités. La forme la plus simple est (si MA représente l'ensemble des matériaux - on a besoin de ρ , de c_p et éventuellement des caractéristiques géométriques - et MO l'ensemble des modèles).

CAIT = CAPA MA MO ;

MA MCHAML de matériau (composantes C, RHO et cara)

MO MMODEL

Elle est calculée automatiquement dans PASAPAS sauf si elle est "lumpée"

(voir LUMPer, PASAPAS)

CHARgement

Crée un objet de type CHARGEME.

CH1 = CHAR mot QT EV;

ou CH2 = CHAR mot ta1 ta2 ;

mot MOT de valeur Q ou TIMP ou TE

Q pour FLUX ou SOUR (ou par MANU), TE pour convection (par MANU), TIMP pour DEPI.

QT CHPOINT de sources ou de températures

EV EVOLUTIO

ta1 TABLE indicée par des entiers (à partir de 0) contenant les « temps » (FLOTTANT)

ta2 TABLE indicée par les mêmes entiers contenant les chargements (CHPOINT)

(voir EVOLution, CONvection, DEPIposé, FLUX, MANUel, SOURce)

DIMENSION

Permet d'obtenir la dimension d'une TABLE ou d'un LISTREEL. Utile pour post-traiter les calculs issus de PASAPAS.

NN = DIME TAB1.TEMPS ;

TAB1.TEMPS TABLE contenant les temps conservés par PASAPAS

(voir opérateurs de post-traitement)

EVOLution

Permet de définir une fonction

(voir CHARgement, PROGression)

INDEX

Permet d'obtenir la liste des indices d'une TABLE

(voir TABLE dans le chapitre langage et maillage)

LUMPer

Permet de diagonaliser la matrice de capacité. Dans PASAPAS, il faut utiliser l'indice MASSE_CONSTANTE sinon la matrice de capacité est calculée dans PASAPAS à partir des données de l'indice CARACTERISTIQUES (pour une prise en compte correcte, il faut modifier la procédure TRANSLIN) (voir page 86).

LAIT = LUMP CAIT ;
CAIT RIGIDITE

Voir page 40 pour quelques restrictions importantes.

(voir CAPAcité)

MATERiau

Le matériau de la procédure contient

- les termes issus de la convection (CONVECTION) et de la conduction (THERMIQUE) dans l'indice CARACTERISTIQUES de la table.

MODEle

Le modèle de la procédure contient

- les termes issus de la convection (CONVECTION) et de la conduction (THERMIQUE) dans l'indice MODELE de la table.

PASAPAS

Procédure de calculs transitoires. Résolution de $K T(t) + C T'(t) = Q(t)$

PASAPAS TAB1 ;

TAB1 TABLE contenant les données et les résultats. Elle doit être déclarée comme telle avant utilisation

TAB1 = TABL ;

De même que (éventuellement pour les températures initiales)

TAB1.TEMPERATURES = TABL ;

Données (les indices suivants sont à renseigner avant l'utilisation de PASAPAS)

TAB1.BLOCAGES_THERMIQUES conditions aux limites (RIGIDITE)
TAB1.CARACTERISTIQUES matériaux (MCHAML) -

composantes **K, C, RHO, H, SECT, EPAI**

TAB1.CHARGEMENT chargement (CHARGEME)

TAB1.MODELE modèles (MMODEL) -

THERMIQUE, CONVECTION.

TAB1.MASSE_CONSTANTE Matrice de masse constante issue de LUMPer par exemple (RIGIDITE)

modifier la procédure TRANSLIN

TAB1.PROCEDURE_THERMIQUE **LINEAIRE**

TAB1.RELAXATION_THETA FLOTTANT (0.5 par défaut)

TAB1.'SOUS-RELAXATION'	FLOTTANT (0.5 par défaut)
TAB1.TEMPERATURES . 0	Température initiale (CHPOINT de NATURE DIFFUS). Par défaut, elle est nulle.
TAB1.TEMPS_CALCULES	temps calculés (LISTREEL)
TAB1.TEMPS_SAUVES	temps sauvés en plus des temps initial et final -(facultatif, par défaut tous les temps calculés)
<u>Résultats</u> (les indices suivants sont renseignés par PASAPAS)	
TAB1.TEMPERATURES	températures (TABLE de CHPOINT)
TAB1.TEMPS	temps sauvés (TABLE de LISTREEL)

(voir TABLE dans le chapitre langage et maillage)

17. EXEMPLES TRANSITOIRES LINEAIRES THERMIQUES

17.1 POUR FAIRE UNE REPRISE AVEC PASAPAS

Opérateurs utilisés : *PASAPAS*, *REPRise*, *SAUVer*.

Soit TAB1 la TABLE qui est passée dans **PASAPAS**.

PREMIERE METHODE

Sans sortir de CASTEM2000®

DEUXIEME METHODE

Après sortie de CASTEM2000® où l'on a fait une étape de sauvetage des résultats :

SAUV TAB1 ;

On fait donc une reprise :

REPR ;

Puis, dans les deux cas, il suffit de choisir l'instant de reprise (par défaut, c'est le dernier sauvé) et d'étendre certaines valeurs de la table.

TAB1 . **TEMPERATURES** . npar = ;

TAB1 . **TEMPS_CALCULES** = **PROG** tini **PAS** Δt tfin ;

TAB1 . **TEMPS_SAUVES** = **PROG** tempssauvés ;

Et de relancer

PASAPAS TAB1 ;

17.2 PROBLEME DE DIFFUSION

On résout l'équation de Fick $D \nabla^2 C(t) + C'(t) = 0$. Pour quelques définitions, on se reportera au chapitre « QUANTITES CARACTERISTIQUES EN DIFFUSION ».

Opérateurs utilisés : **BLO**Quer, **CAP**Acité, **CHAN**ger, **CHARG**ement, **DEPI**posé, **ET**, **EVOL**ution, **LUM**Per, **MATE**riau, **MODE**le, **PASAPAS**, **PROG**ression.

On suppose que le maillage est construit tant pour la diffusion que pour les conditions aux limites de concentration imposée.

1^{ère} étape

Définir le (les) modèle(s) pour la diffusion
MOC = MAIC **MODE THERMIQUE ISOTROPE**;

2^{ème} étape

Définir le (les) matériau(x)
pour la diffusion (le FLOTTANT k, coefficient de diffusion, peut être variable en fonction de la géométrie, dans ce cas c'est un MCHAML).

MAC = MOC **MATE K k 'C' 1. RHO 1.** ;

Si le coefficient K varie avec la géométrie, il faut construire un CHPOINT
vérifier que le nom de la composante K est le bon
sinon utiliser **NOM**Composante
transformer en MCHAML avec **CHAN CHAM**

3^{ème} étape

Calculer la matrice d'inertie
MAINE = **CAPA** MAC MOC ;
MAINE = **LUMP** MAINE ; *modifier la procédure TRANSLIN*

4^{ème} étape

Définir les conditions aux limites
concentrations imposées
LAF = **BLOQ T** MAIF ; *frontière froide*
LAC = **BLOQ T** MAIH ; *frontière chaude*
relations entre concentrations
LAR = **RELA** ...;

5^{ème} étape

Définir les chargements
concentrations imposées
CAC = **DEPI** LAC chau ; *frontière chaude*
le FLOTTANT c, concentration imposée, peut dépendre de la géométrie, dans ce cas c'est un CHPOINT.

6^{ème} étape

Définir l'évolution du chargement

XX = **PROG ...** ;
YY = **PROG ...** ;
EVCO = **EVOL MANU** abs XX ord YY ;
CHCO = **CHAR TIMP** EVCO CAC ;

7^{ème} étape

Remplir les indices de la table.

TA1 = **TABL** ;
* *modifier la procédure TRANSLIN*
TA1 . **MASSE_CONSTANTE** = MAINE ;
TA1 . **MODELE** = MOC ;
TA1 . **BLOCAGES_THERMIQUES** = LAF ET LAC ;
TA1 . **CHARGEMENT** = CHCO ;
TA1 . **TEMPERATURES** = **TABL** ;
MC = **CHAN POI1** MAIC ;
MH = **CHAN POI1** MAIH ;
MCH = MC **DIFF** MH ;
T0C = **MANU CHPO** MCH 1 T C0 **NATURE DIFFUS** ;
T0H = **MANU CHPO** MH 1 T CHAU **NATURE DIFFUS** ;
TA1 . **TEMPERATURES . 0** = T0C ET T0H ;
TA1 . **CARACTERISTIQUES** = MAC ;
TA1 . **TEMPS_CALCULES** = **PROG ...** ;
TA1 . **PROCEDURE_THERMIQUE** = **LINEAIRE** ;

8^{ème} étape

Appel de la procédure PASAPAS.

PASAPAS TA1 ;

On trouvera dans le volume POST-TRAITEMENT un exemple permettant de visualiser le débit ou la quantité sur une frontière en fonction du temps.

18. CALCULS TRANSITOIRES NON LINEAIRES THERMIQUES

lire d'abord le chapitre CALCULS THERMIQUES LINEAIRES

Le temps intervient explicitement et tous les paramètres peuvent dépendre de T ou de t (conductivité $\lambda(T,t)$, convection $h(T,t)$, rayonnement, chargements $(Q(T,t), \Phi(T,t))$)

CAPAcité

Calcul des matrices de capacités. La forme la plus simple est (si MA représente l'ensemble des matériaux - on a besoin de ρ , de c_p et éventuellement des caractéristiques géométriques - et MO l'ensemble des modèles).

```
CAIT = CAPA MA MO ;  
MA    MCHAML de matériau (composantes C, RHO et cara)  
MO    MMODEL
```

Elle est calculée automatiquement dans PASAPAS sauf si elle est "lumpée" (dans ce cas elle est constante)

Dans le cas du changement de phase, la syntaxe devient (si on utilise PASAPAS il faut initialiser l'indice PHASE)

```
TAB1 = TABL ;  
TAB1.SOUSTYPE = THERMIQUE ;  
TAB1.'CHALEUR LATENTE' = 1 ;  
TAB1.'TPHASE 1' =  $\theta_1$  ;  
TAB1.'TPHASE 2' =  $\theta_2$  ;  
CAIT = CAPA MA MO TAB1 ;  
MA    MCHAML de matériau (composantes C, RHO et cara)  
MO    MMODEL  
TAB1 TABLE qui contient les indices suivants  
1      Chaleur latente (FLOTTANT)  
 $\theta_1$  Borne inférieure de la plage (FLOTTANT)  
 $\theta_2$  Borne supérieure de la plage (FLOTTANT)
```

(voir LUMPer, PASAPAS)

CHARgement

Crée un objet de type CHARGEME.

```
CH1 = CHAR mot QT EV ;  
ou   CH2 = CHAR mot ta1 ta2 ;  
mot   MOT de valeur Q ou TE ou TIMP  
      Q pour FLUX ou SOUR (ou par MANU), TE pour convection ou  
      rayonnement (par MANU), TIMP pour DEPL.  
QT    CHPOINT de sources ou de températures  
EV    EVOLUTIO  
ta1   TABLE indicée par des entiers (à partir de 0) contenant les « temps »  
      (FLOTTANT)  
ta2   TABLE indicée par les mêmes entiers contenant les chargements  
      (CHPOINT)
```

(voir *EVOLution, CONVection, DEPImposé, FLUX, MANUel, SOURce*)

DIMEnsion

Permet d'obtenir la dimension d'une TABLE ou d'un LISTREEL. Utile pour post-traiter les calculs issus de PASAPAS.

NN = **DIME** TAB1.**TEMPS** ;

TAB1.**TEMPS** TABLE contenant les temps conservés par PASAPAS

(voir *opérateurs de post-traitement*)

EVOLution

Définition des chargements

Définition des variations de coefficients

(voir *CHARgemen, MATERiau, PROGRession*)

FFORme

Calcul des facteurs de forme dans une cavité rayonnante. Il est appelé par PASAPAS. Plusieurs options sont a priori permises mêmes si dans PASAPAS standard, trois seulement sont utilisées. La cavité doit être décrite par une ligne (ou une surface) dont la normale est dirigée vers l'intérieur.

CF = **FFOR** mo ; *forme utilisée par PASAPAS*

CF = **FFOR** mo **CVXE** ; *forme utilisée par PASAPAS (indice CONVEXE)*

CF = **FFOR** mo **SYME** p1 p2 (p3) ;

CF = **FFOR** mo **NNOR** ; *forme utilisée par PASAPAS (indice FERME)*

CF = **FFOR** mo **ABSO** fa ;

mo MMODEL s'appuyant sur le MAILLAGE de la cavité

CF MCHAML à deux composantes (SURF et MIDL)

CVXE la cavité est convexe (par défaut elle est concave)

SYME la cavité est symétrique (droite passant par p1, p2 en 2D, plan passant par p1, p2, p3 en 3D). Ne marche pas en axisymétrique. La droite (ou le plan) de symétrie ne doit pas être maillé.

NNOR pour une cavité ouverte, on ne normalise pas CF.

ABSO l'intérieur de la cavité a un coefficient d'absorption de fa (fournir un FLOTTANT négatif). Incompatible avec CVXE et SYME

(voir *PASAPAS*)

HRAYO

Permet de calculer le coefficient d'échange lors du rayonnement face à face

INDEx

Permet d'obtenir la liste des indices d'une TABLE.

(voir *TABLE dans le chapitre langage*)

LUMPer

Permet de diagonaliser la matrice de capacité. Dans PASAPAS, il faut utiliser l'indice MASSE_CONSTANTE sinon la matrice de capacité est calculée dans PASAPAS à partir des

données de l'indice CARACTERISTIQUES (pour une prise en compte correcte, il faut modifier la procédure TRANSNON ou DUPONT2). Il faut éviter d'utiliser cette option dans le cas du changement de phase (voir page 86).

LAIT = LUMP CAIT ;
CAIT RIGIDITE

Voir page 40 pour quelques restrictions importantes.

(voir CAPAcité)

MATERiau

Le matériau de la procédure contient

- les termes issus de la convection (CONVECTION), du rayonnement (RAYONNEMENT) et de la conduction (THERMIQUE) dans l'indice CARACTERISTIQUES de la table.

MODEle

Le modèle de la procédure contient

- les termes issus de la convection (CONVECTION) et de la conduction (THERMIQUE) dans l'indice MODELE de la table.
- les termes issus du rayonnement (RAYONNEMENT) dans l'indice RAYONNEMENT . i . MODELE de la table.

PASAPAS

Procédure de calculs non linéaires. Résolution de $K(T) T(t) + C(T) T'(t) = Q(T,t)$

PASAPAS TAB1 ;

TAB1 TABLE contenant les données et les résultats. Elle doit être déclarée comme telle avant utilisation

TAB1 = TABL ;

De même que si la température initiale est non nulle dans les unités utilisées

TAB1.TEMPERATURES = TABL ;

De même que si il y a du rayonnement

TAB1.RAYONNEMENT = TABL ;

De même que si il y a du changement de phase

TAB1.PHASE = TABL ;

Données (les indices suivants sont à renseigner avant l'utilisation de

PASAPAS)

TAB1.BLOCAGES_THERMIQUES conditions aux limites (RIGIDITE)
TAB1.CARACTERISTIQUES matériaux (MCHAML) -

composantes **K, C, RHO, H, EMIS, ESUP, EINF, SECT, EPAI**

TAB1.CELSIUS

VRAI - calcul en °C

FAUX - calcul en K (par défaut)

seulement s'il y a du rayonnement

TAB1.CHARGEMENT

chargement (CHARGEME)

TAB1.MODELE

modèles (MMODEL) -

THERMIQUE, CONVECTION

TAB1.MASSE_CONSTANTE

Matrice de masse constante issue

	de LUMPer par exemple (RIGIDITE). Attention au cas C(T) ou $\rho(T)$ ou changement de phase. Sinon elle est calculée dans la procédure à partir des caractéristiques. <i>modifier la procédure</i> TRANSNON ou DUPONT2 Changement de phase (TABLE)
TAB1.PHASE	THERMIQUE
TAB1.PHASE .SOUSTYPE	
TAB1.PHASE .'CHALEUR LATENTE'	(FLOTTANT)
TAB1.PHASE .'TPHASE 1'	(FLOTTANT) θ_1
TAB1.PHASE .'TPHASE 2'	(FLOTTANT) $\theta_2 \neq \theta_1$
TAB1.PROCEDURE_THERMIQUE	NONLINEAIRE
	DUPONT
TAB1.RAYONNEMENT	TABLE indiquée par le numéro de la zone
TAB1.RAYONNEMENT. i	TABLE (i représente le numéro de la frontière. Chaque frontière ne peut supporter qu'un CONStituant)
TAB1.RAYONNEMENT. i .TYPE	MOT (INFINI ou CAVITE)
TAB1.RAYONNEMENT. i .MODELE	MMODEL de la zone
TAB1.RAYONNEMENT. i .CONVEXE	LOGIQUE (dans le cas CAVITE)
TAB1.RAYONNEMENT. i .FERME	LOGIQUE (dans le cas CAVITE)
TAB1.RELAXATION_THETA	FLOTTANT (0.5 par défaut)
TAB1.SOUS_RELAXATION	FLOTTANT (0.5 par défaut)
TAB1.TEMPERATURES . 0	température initiale (CHPOINT de NATURE DIFFUS). Par défaut, elle est nulle.
TAB1.TEMPS_CALCULES	temps calculés (LISTREEL)
TAB1.TEMPS_SAUVES	temps sauvés en plus des temps initial et final -(facultatif, par défaut tous les temps calculés)
 <u>Résultats</u> (les indices suivants sont renseignés par PASAPAS)	
TAB1.TEMPERATURES	températures (TABLE de CHPOINT)
TAB1.TEMPS	temps sauvés (TABLE de LISTREEL)

(voir TABLE dans le chapitre langage)

19. EXEMPLES TRANSITOIRES NON LINEAIRES THERMIQUES

19.1 POUR FAIRE UNE REPRISE AVEC PASAPAS

Opérateurs utilisés : *PASAPAS*, *REPRise*, *SAUVer*.

Soit TAB1 la TABLE qui est passée dans **PASAPAS**.

PREMIERE METHODE

Sans sortir de CASTEM2000®

DEUXIEME METHODE

Après sortie de CASTEM2000® où l'on a fait une étape de sauvetage des résultats :

SAUV TAB1 ;

On fait donc une reprise :

REPR ;

Puis, dans les deux cas, il suffit de choisir l'instant de reprise (par défaut, c'est le dernier sauvé) et d'étendre certaines valeurs de la table.

TAB1 . **TEMPERATURES** . npar = ;

TAB1 . **TEMPS_CALCULES** = **PROG** tini **PAS** Δt tfin ;

TAB1 . **TEMPS_SAUVES** = **PROG** tempssauvés ;

Et de relancer

PASAPAS TAB1 ;

19.2 APPROCHE DE LA CONVECTION

a) Rappel sur la Convection Forcée

Le flux convectif s'écrit $\Phi = \int_S h(T)(T_{EXT} - T)dS$ avec $h(T)$ fourni par la formule :

$$Nu = \frac{h(T)L}{\lambda} = A Re^m Pr^n$$

avec Nu Nombre de Nusselt

$$Pr \quad \text{Nombre de Prandtl} \quad Pr = \frac{\mu C_P}{\lambda}$$

$$Re \quad \text{Nombre de Reynolds} \quad Re = \frac{\rho UL}{\mu}$$

A,n,m Constantes dépendant de la géométrie et du fluide

Dans CASTEM2000[®], le terme « $h(T)T$ » est pris en compte dans l'opérateur **CONduction**, et le terme « $h(T)T_{EXT}$ » par l'opérateur **CONvection** ou l'opérateur **CHARGement**. Dans la suite on verra un exemple particulier pour prendre en compte $h(T)$. Si h est constant, on est ramené à un problème linéaire (voir le chapitre correspondant page 36).

b) La Convection Naturelle

On parle de convection naturelle si $Gr*Pr > 1000$. Le flux convectif s'écrit de la même manière, avec $h(T)$ fourni par la formule :

$$Nu = \frac{h(T)L}{\lambda} = C(Gr Pr)^n$$

avec Nu Nombre de Nusselt

$$Pr \quad \text{Nombre de Prandtl} \quad Pr = \frac{\mu C_P}{\lambda}$$

$$Gr \quad \text{Nombre de Grashof} \quad Gr = \frac{L^3 \rho^2 g \beta \Delta T}{\mu^2}$$

C,n Constantes dépendant de la géométrie et du fluide

On peut donc écrire $h(T) = h_0(T)(T_{EXT} - T)^n$

$$\text{avec } h_0(T) = \frac{C\lambda}{L} \left(\frac{C_P L^3 \rho^2 g \beta}{\lambda \mu} \right)^n$$

On peut donc écrire le flux sous la forme

$$\Phi = \int_S h_0(T)(T_{EXT} - T)^{1+n} dS$$

c) Application : Prise en compte d'un coefficient h variable dans CASTEM2000®

Opérateurs utilisés : -, +, *, /, **, *ABSolu*, *CONduction*, *CONvection*, *EVOLution*, *INSEre*, *MATERiau*, *MODEle*, *PASAPAS*, *PROGression*, *REPEter*.

Le coefficient h(T) varie dans la plage T_{inf} , T_{sup} , suivant la formule $h_1 = h_0 * (T_{ext} - T)^n$. La plage est découpée en M intervalles. (Attention **H** est un mot réservé)

définition de M, H0, N ≠ 0, TEXT

DT = TSUP - TINF ;

DT = DT / M ;

puis

PT = **PROG** tinf **PAS** dt tsup ;

PC = **PROG** (M + 1) * TEXT ;

PH = **ABS** (PC - PT) ** N ;

PH = H0 * PH ;

ou

T0 = TINF ;

i = 1 ;

PT = **PROG** ;

PH = **PROG** ;

REPE B1 (M + 1) ;

H1 = **ABS** ((TEXT - T0)) ** N ;

h1 = h0 * h1 ;

PT = **INSE** PT i T0 ;

PH = **INSE** PH i h1 ;

T0 = T0 + DT ;

i = i + 1 ;

FIN B1 ;

puis

hev = **EVOL** MANU T PT H PH ;

MO1 = **MODE** MAIL1 **CONVECTION** ;

MA1 = **MATE** MO1 H hev ;

FC = **MANU** **CHPO** MAIF 1 T text **NATURE DISCRET** ;

définition de la variation de text en fonction du temps

ev = **EVOL** MANU ... ;

ch1 = **CHAR** TE FC EV ;

puis (voir page 54)

T1 = **TABL** ;

T1 . **TEMPERATURES** = **TABL** ;

T1 . **TEMPERATURES** 0. = **MANU** **CHPO** mail 1 T tin ; tin > text

ooo

PASAPAS T1 ;

d) Calcul des bilans

Cette partie est développée dans le volume Post-Traitements. Néanmoins on remarquera que

la seule formule du flux convectif permet d'obtenir le bilan.

Il suffit d'appliquer la formule qui se transforme dans le langage CASTEM2000[®] par :

$$\text{Bilan} = \text{Cond} * \text{Temp} - \text{Conv}$$

avec Cond opérateur COND avec composante H

 Temp opérateur RESO

 Conv opérateur CONV

et ceci sur n'importe quelle partie de la frontière.

19.3 LE RAYONNEMENT

Les températures sont écrites en K dans les formules. Dans les données CASTEM2000[®], cela dépend de l'indice CELSIUS.

a) Cas du milieu infini

$$\text{Le flux radiatif s'écrit } \Phi = \int_S \frac{\sigma \varepsilon \varepsilon_{\text{inf}}}{1 - (1 - \varepsilon_{\text{inf}})(1 - \varepsilon)} (T_{\text{EXT}}^4 - T^4) dS$$

Avec ε émissivité de la surface et ε_{inf} émissivité du milieu ambiant. Dans CASTEM2000[®], en particulier dans PASAPAS, on prend $\varepsilon_{\text{inf}} = 1$. Dans le cas contraire, il faut modifier la valeur de ε .

Convection et rayonnement infini

On suppose que sur la frontière MAIF on a échange par convection et échange par rayonnement en milieu infini.

Opérateurs utilisés : **CHARGement**, **MANuel**, **MATERiau**, **MODEle**, **PASAPAS**.

mor = **MODE MAIF RAYONNEMENT CONS** moray ;

moc = **MODE MAIF CONVECTION CONS** mocon ;

mar = **MATE** mor **EMIS** ε ;

mac = **MATE** moc **H** h ;

définition de la conduction

FC = **MANU CHPO MAIF 1 T** text **NATURE DISCRET** ;

définition de la variation de text en fonction du temps

ch1 = **CHAR TE FC EV** ;

TAB1 = **TABL** ;

TAB1 . **CELSIUS** = **VRAI** ;

TAB1 . **MODELE** = moc ; *(et modèle de conduction)*

TAB1 . **CARACTERISTIQUES** = mar et mac ; *(et matériau de conduction)*

TAB1 . **CHARGEMENT** = ch1 ; *(et autres chargements)*

TAB1 . **RAYONNEMENT** = **TABL** ;

TAB1 . **RAYONNEMENT . 1** = **TABL** ;

(Chaque frontière ne peut supporter qu'un CONStituant)

TAB1 . **RAYONNEMENT . 1 . TYPE** = **INFINI** ;

TAB1 . **RAYONNEMENT . 1 . MODELE** = mor ;

PASAPAS TAB1 ;

b) Cas du face à face

Le flux radiatif s'écrit $\Phi = \int_S \frac{\sigma \varepsilon_1 \varepsilon_2}{1 - (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)} (T_1^4 - T_2^4) dS$ que l'on peut écrire

$$\Phi = \int_S h(T)(T_1 - T_2) dS$$

$$\text{avec } h(T) = \frac{\sigma \varepsilon_1 \varepsilon_2}{1 - (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)} (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)$$

Prise en compte d'un coefficient h variable dans CASTEM2000®

Après la modification suivante à faire dans PASAPAS,

```

SI (EGA 'FACE' (ETAB.RAYONNEMENT.(&BOU_RA1).TYPE)) ;
  tb = EXTR (ETAB.RAYONNEMENT.(&BOU_RA1).MODELE) ZONE ;
  mr1 = tb . 1 ;
  emi1 = REDU (ETAB.CARACTERISTIQUES) mr1 ;
  mr2 = tb . 3 ;
  emi2 = REDU (ETAB.CARACTERISTIQUES) mr2 ;
  s1 = EXTR emi1 MAIL ;
  s2 = EXTR emi2 MAIL ;
  c12 = RACC s1 s2 .0001 ; On peut jouer sur la valeur du critère
  mc12 = MODE c12 CONVECTION ;
  s1p = CHAN s1 POI1 ;
  s2p = CHAN s2 POI1 ;
  n1 = NBEL s1p ;
OPTI ELEM SEG2 ;
  i = 1 ;
REPE bo1 n1 ;
  SI (EGA i 1) ;
    rel12 = (s1 POIN i ) D 1 (s2 POIN i ) ;
  SINO ;
    rel12 = rel12 ET ((s1 POIN i ) D 1 (s2 POIN i )) ;
  FINS ;
  i = i + 1 ;
FIN bo1 ;
  t1 = REDU ( EXCO T u_bou1 T ) s1 ;
  t2 = REDU ( EXCO T u_bou1 T ) s2 ;
  h12 = HRAYO mc12 mr1 emi1 t1 mr2 emi2 t2 rel12 CTE_SB ;
  mr12 = MATE mc12 H h12 ;
  MAT_RIGI = MAT_RIGI ET RIG_RAD ;
FINS ;

```

il faut mettre les indices suivants pour PASAPAS :

Soit LI et LS les MAILLAGE entre lesquels se fait le rayonnement. LI et LS doivent être identiques nœuds à nœuds.

```

  mri = MODE li RAYONNEMENT ;
  mari = MATE mri EMIS ε1 ;
  mrs = MODE ls RAYONNEMENT ;
  mars = MATE mrs EMIS ε2 ;
  TAB1 . MODELE = ; tous les modèles sauf le rayonnement
  TAB1 . CARACTERISTIQUES = ; tous les matériaux
  TAB1 . CHARGEMENT = ;
  TAB1 . RAYONNEMENT = TABL ;
  TAB1 . RAYONNEMENT . 1 = TABL ;
  TAB1 . RAYONNEMENT . 1 . TYPE = MOT 'FACE' ;

```

TAB1 . RAYONNEMENT . 1 .MODELE = mri et mrs ;

c) Cas de la cavité

TAB1 . RAYONNEMENT = TABL ;
TAB1 . RAYONNEMENT . 1 = TABL ;
TAB1 . RAYONNEMENT . 1 .TYPE = CAVITE ;
TAB1 . RAYONNEMENT . 1 .MODELE= mor ;
TAB1 . RAYONNEMENT . 1 .CONVEXE= ;
TAB1 . RAYONNEMENT . 1 .FERME= ;

19.4 LE CHANGEMENT DE PHASE

Dans le cas général, la solidification correspond à une diminution de la chaleur massique et donc à un puits de chaleur, tandis que la fusion correspond à une augmentation de la chaleur massique et donc à une source de chaleur.

On étudie le réchauffement d'un barreau.

Opérateurs utilisés : **CHAR**gement, **DROI**t, **MAN**uel, **MATE**riau, **MODE**le, **PASAPAS**, **PROG**ression.

```
opti dime 2 elem seg2 mode plan ;
* maillage en élément SEG2
p1 = 0. 0. ;
p2 = 0.1 0. ;
p3 = 0.2 0. ;
p4 = 0.5 0. ;
p5 = 1. 0. ;
115 = p1 droi 10 p2 droi 5 p3 droi 6 p4 droi 5 p5 ;
* définition du modèle et de l'élément fini
mo1 = 115 mode thermique isotrope barr ;
* caractéristiques du matériau
ma1 = mate mo1 k 1.08 'C'1. rho 1. sect 1. ;
* définition du chargement, flux au point P1
ff1 = manu chpo p1 1 q 1. nature discret ;
* évolution du chargement
xx = prog 0. 1. 2. ;
yy = prog 0. 281. 562. ;
ev = evol manu abs xx ord yy ;
ch1 = char q ff1 ev ;
* définition de la table pour PASAPAS
ta1 = tabl ;
ta1 . caracteristiques= ma1 ;
ta1 . chargement = ch1 ;
ta1 . modele = mo1 ;
* caractéristiques du changement de phase
ta1 . phase= tabl ;
ta1 . phase . 'CHALEUR LATENTE'= 70.26 ;
ta1 . phase . soustype = thermique ;
ta1 . phase . 'TPHASE 1'= 1. ;
ta1 . phase . 'TPHASE 2' = 1.00001 ;
ta1 . procedure_thermique= dupont ;
ta1 . temperatures = tabl ;
* températures initiales
ta1 . temperatures . 0 = manu chpo 115 1 t 0. nature diffus ;
* temps calculés (pas de temps du schéma)
ta1 . temps_calcules = prog 0. pas 1.e-2 1. ;
pasapas ta1 ;
* pour la suite voir le volume POST-TRAITEMENTS
```

20. TYPE D'OBJETS CREES

Ils sont définis par des mots de huit lettres au maximum. Le type d'un objet peut être retrouver par l'opérateur **TYPE**.

motype = **TYPE** objet ;

CHARGEME

Créé par : **CHAR**

Utilisé par : **PASAPAS**

CHPOINT (voir note sur la nature des CHPOINT dans le chapitre CHARGEMENTS THERMIQUES page 36)

Créé par : **CHAN, CONV, DEPI, FLUX, MANU, RESO, SOUR**

Utilisé par : **CHAR, (CONV), (DEPI), PASAPAS, RESO**

ENTIER (voir volume Maillage et Présentation du Langage)

Créé par :

Utilisé par :

EVOLUTIO

Créé par : **EVOL,**

Utilisé par : **CHAR**

FLOTTANT (voir volume Maillage et Présentation du Langage)

Créé par :

Utilisé par :

LISTENTI (voir volume Maillage et Présentation du Langage)

Créé par : **LECT**

Utilisé par :

LISTMOTS

Créé par : **MOTS**

Utilisé par :

LISTREEL (voir volume Maillage et Présentation du Langage)

Créé par : **PROG**

Utilisé par : **EVOL**

LOGIQUE (voir volume Maillage et Présentation du Langage)

Créé par :

Utilisé par : **PASAPAS**

MAILLAGE (voir volume Maillage et Présentation du Langage)

Créé par : **MANU**

Utilisé par : **BLOQ, FLUX, MANU, MODE, RELA, RIGI, SOUR**

MCHAML

Créé par : **CHAN, MANU, MATE**

Utilisé par : **CAPA, COND**

MMODEL

Créé par : **MODE**

Utilisé par : **CAPA, COND, MATE**

MOT

Créé par : **MOT, TYPE**

Utilisé par : **BLOQ, MATE, MODE, OPTI, PASAPAS, RELA**

POINT (voir volume Maillage et Présentation du Langage)

Créé par :

Utilisé par : **BLOQ, MANU, MODE, PASAPAS**

RIGIDITE

Créé par : **BLOQ, CAPA, COND, MANU, RELA**

Utilisé par : **LUMP, RESO**

TABLE (voir volume Maillage et Présentation du Langage)

Créé par : **TABL**

Utilisé par : **CHAR, PASAPAS**

TEXTE

Créé par :

Utilisé par :

21. ESSAI DE RECENSEMENT DES VALEURS PAR DEFAUT

Pour chacun des opérateurs, on fournit, quand elles existent , les valeurs par défaut prises par CASTEM2000[®].

CONVection
DEPIposé
FFORme
MANUel
MATÉriau
MODEle
OPTIon
PASAPAS
RESOLution

22. REFERENCES GENERALES

Heat Transmission	W.H. Mc Adams	
	<i>McGraw-Hill</i>	1954 (3 ^e édition)
Transmission de la Chaleur	A. Beaufils (trad.)	
	<i>Dunod</i>	1961 (2 ^e édition)
Conduction of Heat in Solids (2 tomes)	H.S. Carslaw - J.C. Jaeger	
	<i>Oxford Clarendon Press</i>	1959 (2 ^e édition)
	F. Kreith	
		19
Transmission de la Chaleur et Thermodynamique	(trad.)	
	<i>Masson</i>	1967
Heat Transfer	Jakob	
	<i>J. Wiley & Sons</i>	
Transmission de la Chaleur par Rayonnement	A. Gouffé	
	<i>Eyrolles</i>	1968
Analysis of Heat and Mass Transfer	E.R.G. Eckert - R.M. Drake	
	<i>McGraw-Hill</i>	1972
Radiative Heat Transfer	H.C. Hottel - A.F. Sarofim	
	<i>McGraw-Hill</i>	1972
Transmission de la Chaleur par Convection Naturelle	R. Giblin	
	<i>Eyrolles</i>	1974
Heat Transfer Calculations Using Finite Difference Equations	D.R. Croft - D.G. Lilley	
	<i>Applied Science Publishers</i>	1977
Initiation aux Transferts Thermiques	J.F. Sacadura	
	<i>Tec&Doc</i>	1978
Heat Conduction	M.N. Ozisik	
	<i>J. Wiley & Sons</i>	1980
Transferts de Chaleur	A. Bouvenot	
	<i>Masson</i>	1981
Guide Technique de Thermique	J. Gosse	
	<i>Bordas</i>	1981
Convective Heat Transfer	L.C. Burmeister	

	<i>J. Wiley & Sons</i>	1983
La Transmission de la Chaleur	A.B. De Vriendt <i>Gaetan Morin</i>	1984
Heat and Mass Transfer	F.M. White <i>Addison-Wesley</i>	1988
Transferts Thermiques	J. Taine - J.P. Petit <i>Dunod</i>	1989
Heat Transfer	J.P. Holman <i>McGraw-Hill</i>	1990
Transfert de Chaleur (3 tomes)	J. Crabol <i>Masson</i>	1989-90-92
Finite Element Analysis for Heat Transfer	H.C. Huang - A.S. Usmani <i>Springer Verlag</i>	1994
The Finite Element Method in Heat Transfer Analysis	R.W. Lewis - K. Morgan <i>J. Wiley & Sons</i>	1996
Thermal Contact Conductance	C.V. Madhasudana <i>Springer Verlag</i>	1996
Manuel de Thermique	B. Eyglunet <i>Hermès</i>	1997 (2 ^e édition)

23. ANNEXE THEORIQUE

23.1 SCHEMA TRANSITOIRE LINEAIRE

$$\left(\theta K + \frac{C}{\Delta t}\right)T(t + \Delta t) = \left((\theta - 1)K + \frac{C}{\Delta t}\right)T(t) + Q(\tau)$$

$Q(\tau)$ est évalué de la manière suivante

composante TIMP $\tau = t + \Delta t$

composante Q et TE $\tau = \lambda(t + \Delta t) + (1 - \lambda)t$

avec

θ paramètre RELAXATION_THETA (=0.5 par défaut, schéma implicite)
 $0 \leq \theta \leq 1$

quand $0 \leq \theta < 0.5$, le pas de stabilité est $\frac{\Delta x^2}{(2 - 4\theta)D}$

quand $0.5 \leq \theta \leq 1$, le schéma (Crank-Nicolson pour $\theta = 0.5$) est stable

λ paramètre 'SOUS-RELAXATION' (=0.5 par défaut)
 $0 \leq \lambda \leq 1$

K matrice de conductivité (CONDUCTION)

C matrice de capacité (CAPACITÉ)

$T(0)$ Température initiale

Note : Attention à SOUS-RELAXATION, différent de SOUS_RELAXATION

23.2 SCHEMA TRANSITOIRE NON LINEAIRE

a) Schéma transitoire

$$\left(\theta K + \frac{C}{\Delta t}\right)T(t + \Delta t) = \left((\theta - 1)K + \frac{C}{\Delta t}\right)T(t) + Q(\tau)$$

$Q(\tau)$ est évalué de la manière suivante

composante TIMP $\tau = t + \Delta t$

composante Q et TE $\tau = \lambda(t + \Delta t) + (1 - \lambda)t$

avec

θ paramètre RELAXATION_THETA (=0.5 par défaut, schéma implicite)
 $0 \leq \theta \leq 1$

quand $0 \leq \theta < 0.5$, le pas de stabilité est $\frac{\Delta x^2}{(2 - 4\theta)D}$

quand $0.5 \leq \theta \leq 1$, le schéma (Crank-Nicolson pour $\theta = 0.5$) est stable

λ paramètre SOUS_RELAXATION (=0.5 par défaut)
 $0 \leq \lambda \leq 1$

K matrice de conductivité (CONDuction)

C matrice de capacité (CAPAcité)

$T(0)$ Température initiale

Note : Attention à SOUS_RELAXATION, différent de SOUS-RELAXATION

b) Schéma itératif

Les matrices K , C et le vecteur Q sont évalués à la température

$$T = \lambda T_n + (1 - \lambda)T_{n-1}$$

La convergence est atteinte quand

$$\text{Max} |T_{n+1} - T_n| < \varepsilon$$

ε indice PRECISION (=10⁻⁵ par défaut)

23.3 SCHEMA TRANSITOIRE DUPONT2

C'est un schéma à deux pas de temps, le premier doit donc être calculé d'une autre façon. On reprend donc l'algorithme précédent.

a) Premier pas

$$\left(\theta K + \frac{C}{\Delta t}\right)T(\Delta t) = \left((\theta - 1)K + \frac{C}{\Delta t}\right)T(0) + Q(\tau)$$

Q(τ) est évalué de la manière suivante

composante TIMP $\tau = \Delta t$

composante Q et TE $\tau = \lambda \Delta t$

avec

θ paramètre RELAXATION_THETA (=0.5 par défaut, schéma implicite)
 $0 \leq \theta \leq 1$

quand $0 \leq \theta < 0.5$, le pas de stabilité est $\frac{\Delta x^2}{(2 - 4\theta)D}$

quand $0.5 \leq \theta \leq 1$, le schéma (Crank-Nicolson pour $\theta = 0.5$) est stable

λ paramètre SOUS_RELAXATION (=0.5 par défaut)
 $0 \leq \lambda \leq 1$

K matrice de conductivité (CONDuction)

C matrice de capacité (CAPAcité)

T(0) Température initiale

Les matrices K, C et le vecteur Q sont évalués à la température

$$T = \lambda T_n + (1 - \lambda)T_{n-1}$$

Note : Attention à SOUS_RELAXATION, différent de SOUS-RELAXATION

b) Pas suivants

$$\left((0.5 + a)K + \frac{C}{\Delta t}\right)T(t + \Delta t) = \left((2a - 0.5)K + \frac{C}{\Delta t}\right)T(t) - aKT(t - \Delta t) + Q(\tau)$$

Q(τ) est évalué de la manière suivante

composante TIMP $\tau = t + \Delta t$

composante Q et TE $\tau = \lambda(t + \Delta t) + (1 - \lambda)t$

avec

a paramètre RELAXATION_DUPONT (=0.25 par défaut)
 $0 \leq a \leq 1$

pour a = 0, on retrouve le schéma de Crank-Nicolson

λ paramètre SOUS_RELAXATION (=0.5 par défaut)
 $0 \leq \lambda \leq 1$

K matrice de conductivité (CONDuction)

C matrice de capacité (CAPAcité)

T(Δt) Température calculée au premier pas

Les matrices K , C et le vecteur Q sont évalués à la température

$$T = (1+\lambda)T_n - \lambda T_{n-1}$$

Note : Attention à SOUS_RELAXATION, différent de SOUS-RELAXATION

23.4 POURQUOI DIAGONALISER LA MATRICE DE CAPACITE

a) Un premier exemple éloquent : choc thermique

Soit une barre de longueur $2L = 1$, de section 10^{-3} , de conductivité 20, de chaleur spécifique 500, de masse volumique 7800. Aux extrémités, on impose une température $T_p = 0$ et la température initiale est $T_0 = 100$ (on a volontairement omis les unités dont on sait qu'elles sont homogènes).

On la modélise avec 2 éléments de BARRE.

La solution analytique générale est

$$T(x,t) = T_p + \frac{4(T_0 - T_p)}{\pi} \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \sin\left(\frac{k\pi x}{2L}\right) \exp\left[-\left(\frac{k\pi}{2L}\right)^2 Dt\right] \right\}$$

(la somme est effectuée sur les k impairs)

avec $D = \lambda / \rho C = 5.13 \cdot 10^{-6} =$ diffusivité

Pour un élément, la matrice de conductivité est (COND)

$$\begin{bmatrix} .04 & -.04 \\ -.04 & .04 \end{bmatrix} \text{ les termes sont inversement proportionnels à la longueur de l'élément. Le terme diagonal est égal à } \lambda S / l .$$

Pour un élément, la matrice de capacité est (CAPA)

$$\begin{bmatrix} 650 & 325 \\ 325 & 650 \end{bmatrix} \text{ les termes sont proportionnels à la longueur de l'élément. Le terme diagonal est égal à } \rho C S l / 3 .$$

Pour un élément, la matrice de capacité diagonalisée est (LUMP)

$$\begin{bmatrix} 975 & 0 \\ 0 & 975 \end{bmatrix} \text{ les termes sont proportionnels à la longueur de l'élément. Le terme diagonal est égal à } \rho C S l / 2 .$$

Le système reporté dans l'équation 22.1 donne pour le premier pas de temps avec $\theta = 1$ par exemple :

$$\left\{ \begin{bmatrix} .04 & -.04 & 0 \\ -.04 & .08 & -.04 \\ 0 & -.04 & .04 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} 650 & 325 & 0 \\ 325 & 1300 & 325 \\ 0 & 325 & 650 \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 0 \\ T_2 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} 650 & 325 & 0 \\ 325 & 1300 & 325 \\ 0 & 325 & 650 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 100 \\ 100 \\ 100 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_1 \\ 0 \\ Q_3 \end{bmatrix}$$

On voit que, $\forall \Delta t$ petit, le terme de conductivité est négligeable devant le terme de capacité (il l'est même d'autant plus que Δt est petit), ce qui donne le système suivant. On peut noter que l'on est, pour ce premier pas, dans un schéma explicite ($\theta = 0$) avec une matrice de capacité consistante.

$$325 T_2 = 325 \cdot 300 + Q_1 \Delta t \quad (1)$$

$$325 4T_2 = 325 \cdot 600 \quad (2)$$

$$325 T_2 = 325 \cdot 300 + Q_3 \Delta t \quad (3)$$

L'équation (2) nous indique que $T_2 (=150)$ est supérieur à T_3 ce qui est, par hypothèse, impossible.

Si la matrice de capacité est diagonale (LUMP), on ne peut plus, *a priori*, négliger la partie conductivité. Le système devient (après avoir quand même négligé ce qui est possible)

$$- 0.04 T_2 = Q_1 \quad (1)$$

$$1950 T_2 = 1950 \cdot 100 \quad (2)$$

$$- 0.04 T_2 = Q_3 \quad (3)$$

On voit sur l'équation (2) que l'on a bien $0 \leq T_2 \leq 100$ ce qui est au moins cohérent, mais est-ce juste ?

Si $\Delta t = 1$ ce système donne $T_2 = 100$..

On voit que ce phénomène est indépendant de Δt , tant qu'il est petit, ainsi que de la valeur du second membre. En particulier la diminution de Δt ne permet pas de résoudre le problème (au contraire). Bien évidemment, la résolution numérique est différente mais le problème de précision est néanmoins patent avec un système aussi mal conditionné.

1^e solution : Augmenter le pas de temps (mais on ne peut s'intéresser à ce qui se passe avant le premier pas de temps)

Δt	t	1	10	100	1000	10000
1		150	150	150		
10			150	149	141	
100				149	141	81
1000					141	83
10000						93

Valeurs de T_2 pour 2 éléments et matrice consistante

Δt	t	1	10	100	1000	10000
1		100	100	100		
10			100	100	96	
100				100	96	66
1000					96	67
10000						71

Valeurs de T_2 pour 2 éléments et matrice diagonale

2^e solution : Augmenter le nombre d'éléments puisque leur taille diminuant, la partie conductivité va augmenter tandis que la partie capacité va diminuer.

N	t	1	10	100	1000
2		150	150	150	
20		100	100	100	
200		100	100	100	
2000		100	100	100	

Valeurs de T_2 avec $\Delta t = 1$ et matrice consistante

N	t	1	10	100	1000
2		100	100	100	
20		100	100	100	
200		100	100	100	
2000		100	100	100	
20000					

Valeurs de T_2 avec $\Delta t = 1$ et matrice diagonale

3^e solution : Changer le matériau pour que la diffusivité soit plus grande

b) Un deuxième exemple éloquent : températures imposées

Reprenons notre barre. A une extrémité, on impose une température $T_1 = 0$ et à l'autre une température $T_3 = 100$ (on a volontairement omis les unités dont on sait qu'elles sont homogènes). La température initiale est nulle.

La solution analytique générale est

$$T(x,t) = T_3 - (T_3 - T_1) \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{2L-x}{2\sqrt{Dt}}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{2L}{2\sqrt{Dt}}\right)}$$

avec $D = \lambda / \rho C = 5.13 \cdot 10^{-6} =$ diffusivité

Le système reporté dans l'équation 22.1 donne pour le premier pas de temps avec $\theta = 1$ par exemple :

$$\left\{ \begin{bmatrix} .04 & -.04 & 0 \\ -.04 & .08 & -.04 \\ 0 & -.04 & .04 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} 650 & 325 & 0 \\ 325 & 1300 & 325 \\ 0 & 325 & 650 \end{bmatrix} \right\} \begin{Bmatrix} 0 \\ T_2 \\ 100 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_1 \\ 0 \\ Q_3 \end{Bmatrix}$$

On voit que, $\forall \Delta t$ petit, le terme de conductivité est négligeable devant le terme de capacité (il l'est même d'autant plus que Δt est petit), ce qui donne le système suivant. On peut noter que l'on est, pour ce premier pas, dans un schéma explicite ($\theta = 0$) avec une matrice de capacité consistante.

$$325 T_2 = Q_1 \Delta t \quad (1)$$

$$325 (4T_2 + 100) = 0 \quad (2)$$

$$325 (T_2 + 200) = Q_3 \Delta t \quad (3)$$

L'équation (2) nous indique que $T_2 (= -25)$ est négatif ce qui est, par hypothèse, impossible.

Si la matrice de capacité est diagonale (LUMP), on ne peut plus, *a priori*, négliger la partie conductivité. Le système devient (après avoir quand même négligé ce qui est possible)

$$-0.04 T_2 = Q_1 \quad (1)$$

$$1950 T_2 - 4 \Delta t = 0 \quad (2)$$

$$-0.04 T_2 \Delta t + 97500 = Q_3 \Delta t \quad (3)$$

On voit sur l'équation (2) que l'on a bien $0 \leq T_2 \leq 100$ ce qui est au moins cohérent, mais est-ce juste ?

Si $\Delta t = 1$ ce système donne $T_2 \cong 2 \cdot 10^{-3}$.

On voit que ce phénomène est indépendant de Δt , tant qu'il est petit, ainsi que de la valeur du second membre. En particulier la diminution de Δt ne permet pas de résoudre le problème (au contraire). Bien évidemment, la résolution numérique est différente mais le problème de précision est néanmoins patent avec un système aussi mal conditionné.

1^e solution : Augmenter le pas de temps (mais on ne peut s'intéresser à ce qui se passe avant le premier pas de temps)

Δt	t	1	10	100	1000	10000
1		-25	-25	-25		
10			-25	-25	-20	
100				-25	-21	9
1000					-21	9
10000						4

Valeurs de T_2 pour 2 éléments et matrice consistante

Δt	t	1	10	100	1000	10000
1		$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	0.2		
10			$2 \cdot 10^{-2}$	0.2	2	
100				0.2	2	17
1000					2	17
10000						15

Valeurs de T_2 pour 2 éléments et matrice diagonale

2^e solution : Augmenter le nombre d'éléments puisque leur taille diminuant, la partie conductivité va augmenter tandis que la partie capacité va diminuer.

N	t	1	10	100	1000
2		-25	-25	-25	
20		$2 \cdot 10^{-4}$	$-4 \cdot 10^{-5}$	$-3 \cdot 10^{-5}$	
200		0	0	0	
2000		0	0	0	

Valeurs de T_2 avec $\Delta t = 1$ et matrice consistante

N	t	1	10	100	1000
2		$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	0.2	
20		0	0	0	
200		0	0	0	
2000		0	0	0	

N	t	1	10	100	1000
2		$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	0.2	
20		0	0	0	
200		0	0	0	
20000					

Valeurs de T_2 avec $\Delta t = 1$ et matrice diagonale

3^e solution : Changer le matériau pour que la diffusivité soit plus grande

c) Un troisième exemple éloquent : température et flux imposés

Reprenons notre barre. A une extrémité, on impose une température de 0 et à l'autre une source de 1000 (on a volontairement omis les unités dont on sait qu'elles sont homogènes). La température initiale est nulle.

La solution analytique générale est

avec $D = \lambda / \rho C = 5.13 \cdot 10^{-6} =$ diffusivité

Le système reporté dans l'équation 22.1 donne pour le premier pas de temps avec $\theta = 1$ par exemple :

$$\begin{Bmatrix} .04 & -.04 & 0 \\ -.04 & .08 & -.04 \\ 0 & -.04 & .04 \end{Bmatrix} + \frac{1}{\Delta t} \begin{Bmatrix} 650 & 325 & 0 \\ 325 & 1300 & 325 \\ 0 & 325 & 650 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ T_2 \\ T_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_1 \\ 0 \\ 1000 \end{Bmatrix}$$

On voit que, $\forall \Delta t$ petit, le terme de conductivité est négligeable devant le terme de capacité (il l'est même d'autant plus que Δt est petit), ce qui donne le système suivant. On peut noter que l'on est, pour ce premier pas, dans un schéma explicite ($\theta = 0$) avec une matrice de capacité consistante.

$$325 T_2 = Q_1 \Delta t \quad (1)$$

$$325 (4T_2 + T_3) = 0 \quad (2)$$

$$325 (T_2 + 2T_3) = 1000 \Delta t \quad (3)$$

L'équation (2) nous indique que T_2 et T_3 sont de signes contraires ce qui est, par hypothèse, impossible.

Si la matrice de capacité est diagonale (LUMP), on ne peut plus, *a priori*, négliger la partie conductivité. Le système devient (après avoir négligé ce qui est possible)

$$-0.04 T_2 = Q_1 \quad (1)$$

$$1950 T_2 - 0.04 T_3 \Delta t = 0 \quad (2)$$

$$-0.04 T_2 \Delta t + 975 T_3 = 1000 \Delta t \quad (3)$$

On voit sur l'équation (2) que l'on a bien $0 \leq T_2 \leq T_3$ ce qui est au moins cohérent mais est-ce juste ?

Si $\Delta t = 1$ ce système donne $T_2 \cong 2 \cdot 10^{-5}$ et $T_3 \cong 1$.

On voit que ce phénomène est indépendant de Δt , tant qu'il est petit, ainsi que de la valeur du second membre. En particulier la diminution de Δt ne permet pas de résoudre le problème (au contraire). Bien évidemment, la résolution numérique est différente mais le problème de précision est néanmoins patent avec un système aussi mal conditionné.

Dans les tableaux qui suivent l'* signale que T_2 est négatif.

1^e solution : Augmenter le pas de temps (mais on ne peut s'intéresser à ce qui se passe avant le premier pas de temps)

Δt	t	1	10	100	1000	10000
1		2*	18*	175*		
10			18*	175*	1 662*	11 199*
100				174*	1 654*	11 179*
1000					1 584*	10 986*
10000						9 548

Valeurs de T_3 pour 2 éléments et matrice consistante

Δt	t	1	10	100	1000	10000
1		1	10	102		
10			10	102	1 005	8 518
100				102	1 003	8 508
1000					986	8 406
10000						7 594

Valeurs de T_3 pour 2 éléments et matrice diagonale

2^e solution : Augmenter le nombre d'éléments puisque leur taille diminuant, la partie conductivité va augmenter tandis que la partie capacité va diminuer.

N	t	1	10	100	1000
2		2*	18*	175*	
20		18*	166*	1 116*	
200		95	395	1 275	
2000		113	399	1 276	

Valeurs de T_3 avec $\Delta t = 1$ et matrice consistante

N	t	1	10	100	1000
2		1	10	102	
20		10	100	851	
200		76	385	1 272	
2000		113	399	1 276	4 040
20000		113			

Valeurs de T_3 avec $\Delta t = 1$ et matrice diagonale

3^e solution : Changer le matériau pour que la diffusivité soit plus grande

d) Conclusion

Dans les trois cas précédents, il apparaît que la diagonalisation de la capacité permet d'obtenir, à moindre effort de maillage, une solution physiquement admissible. Et les valeurs non physiques des premiers pas de temps sont quelques fois difficilement rattrapables. Mais, on voit aussi que la précision ne peut être garantie que si le maillage est suffisant. Dans les cas très simples étudiés, le pas de temps en deçà duquel il ne faut pas espérer obtenir des résultats

si la matrice est consistante est $\frac{l^2}{6\theta D}$ avec l = longueur de l'élément, D = diffusivité.

Sur ces trois exemples, que l'on peut facilement répéter, on voit que les problèmes de stabilité, de précision et d'oscillation sont très déconnectés.

L'algorithme explicite est conditionnellement stable. Il faut $\Delta t < \Delta t_{\text{stab}}$

L'algorithme implicite est inconditionnellement stable. Il faut $\Delta t > \Delta t_{\text{seuil}}$

24. REPERES BIOGRAPHIQUES

BIOT Jean-Baptiste	Paris 21-04-1774; Paris 03-02-1862
BOLTZMANN Ludwig	Vienne 20-02-1844; Trieste 05-09-1906
CELSIUS Anders	Uppsala 27-11-1701; Uppsala 25-04-1744
unité de température	
CRANK J	
EULER Leonhardt	Bâle 14-04-1707; Saint Petersburg 18-09-1783
FICK Adolf	Kassel 03-09-1829; Blankenberghe (Belgique) 21-08-1901
FOURIER Jean-Baptiste	Auxerre 21-03-1768; Paris 16-05-1830
FROUDE William	Dartington 28-11-1810; Simonstown (Af. du Sud) 04-05-1879
GRASHOF Franz	Düsseldorf 11-07-1826; Karlsruhe 26-10-1893
GRIFFITH	
KELVIN (lord) William THOMSON	Belfast 26-06-1824; Glasgow 17-12-1912
unité S.I. de température depuis	
JOULE James	Salford 24-12-1818; Chesshire 11-10-1889
unité S.I. d'énergie depuis	
MACH Ernst	Turas (Moravie) 13-02-1838; Vaterstetten (All.) 19-02-1916
unité de vitesse	
MARGOULIS Max	Brody (Ukraine) 23-04-1856; Vienne 04-10-1920
NEWTON Isaac	Grantham 04-01-1643; Kensington 31-03-1727
unité S.I. de force depuis	
NICOLSON	
NUSSELT Ernst	Nuremberg 25-11-1882; Munich 01-09-1957
PASCAL Blaise	Clermont-Ferrand 19-06-1623; Paris 19-08-1662
unité S.I. de pression depuis	
PECLET Jean Claude	Besançon 10-02-1793; Paris 06-12-1857
PLANCK Max	Kiel 23-04-1858; Gottingen 04-10-1947
POISEUILLE Jean-Louis	Paris 22-04-1799; Paris 26-12-1869
unité S.I. de viscosité dynamique depuis	
PRANDTL Ludwig	Freising (All.) 04-02-1875; Gottingen 15-08-1953
RAYLEIGH (lord) John STRUTT	Terling Place 12-11-1842; Whitam 30-06-1919
REYNOLDS Osborne	Belfast 23-08-1842; Somerset (G.B.) 21-02-1912
STANTON Thomas	Atherstone (G.B.) 12-12-1865; Pevensay Bay 30-08-1931
STEFAN Josef	St Peter (Aut.) 24-03-1835; Vienne 07-01-1893
WATT James	Greenock (Ecosse) 19-01-1736; Handsworth 19-08-1819
unité S.I. de puissance depuis	
WEBER Wilhelm	Wittenberg 24-10-1804; Gottingen 23-06-1891
unité S.I. de champ depuis	

25. INDEX

-,37, 54, 71

*

*,37, 54, 71

** ,37, 54, 71

/

/,37, 54, 71

+

+,37, 54, 71

A

ABS,54, 71

ANISOTROPE voir MODE

AXIS voir OPTI

B

BLOCAGES_THERMIQUES voir PASAPAS

BLOQ,34, 38, 40

BLOQ

MAXI,34

MINI,34

T,34, 42, 44, 51, 63

TINF,34, 42, 44, 51

TSUP,34, 42, 44, 51

C

C voir MATE

CAPA,40, 59, 63, 65, 66, 82, 83, 84, 86

CARA,28

CARACTERISTIQUES voir PASAPAS

CAVITE,58, 68, 75

CELSIUS voir PASAPAS

CERC,28

CHAN

CHAM,51

CHAN

ATTR,36

CHAM,42, 44, 63

CHPO,36

POI1,57, 64, 74

CHAR,47, 53, 59, 65, 70

CHAR

Q,47, 51, 59, 65, 76

TE,47, 51, 54, 56, 59, 65, 71, 73

TIMP,47, 51, 59, 64, 65

CHARGEMENT voir PASAPAS

CHPO,36

COLI,37

COND,34, 40, 42, 44, 53, 70, 82, 83, 84, 86

CONS voir MODE

CONV,5, 34, 36, 37, 40, 44, 53, 70, 79

CONV

T,37, 43

CONVECTION voir MODE

COOR,36

D

DEPI,5, 34, 36, 37, 40, 43, 45, 47, 51, 59, 63, 65, 79

DEPL,38

DIFF,64

DIME,47, 59, 66 voir OPTI

DIRE,30 voir FLUX voir MATE

DROI,76

DUPONT,68, 76

E

EGA,57, 74

EINF voir MATE

EMIS voir MATE

EPAI voir MATE, CARA

ESUP voir MATE

ET,34, 40, 43, 45, 64

EVOL,47, 59, 66

EVOL

MANU,31, 50, 51, 54, 64, 71, 76

EXTR

MAIL,57, 74

RIGI,45

RIGT,46

F

FACE,58, 74

FFOR,47, 66, 79

FFOR

ABSO,47, 66

CVXE,47, 66

NNOR,47, 66

SYME,47, 66

FIN,54, 71

FLUX,35, 36, 38, 40, 43, 45, 47, 51, 59, 65

FLUX

DIRE,38

INFE,38

SUPE,38

G

GRAD voir RESO

H

H voir MATE

HRAYO,48, 57, 66, 74

I

INDE,48, 59, 66

INFE voir FLUX
INFERIEURE voir MODE
INFINI,56, 68, 73
INFO,5
INSE,54, 71
ISOTROPE voir MODE

K

K voir MATE
K1 voir MATE
K11 voir MATE
K2 voir MATE
K21 voir MATE
K22 voir MATE
K3 voir MATE
K31 voir MATE
K32 voir MATE
K33 voir MATE

L

LINEAIRE,60, 64
LUMP,40, 60, 63, 66, 68, 86, 87, 88, 90

M

MANU,38, 40, 47, 59, 65
MANU
 CHPO,36, 76
 CHPO,54, 71
 CHPO NATURE DIFFUS,38, 76
 CHPO NATURE DISC,45
 CHPO NATURE DISCRET,38, 43, 51, 54, 56, 64,
 71, 73
 CHPO Q,38
 CHPO QINF,38
 CHPO QSUP,38
 CHPO T,38
 CHPO TINF,38
 CHPO TSUP,38
MATE,21, 28, 33, 48, 60, 67, 79
MATE
 C,28, 29, 30, 48, 60, 63, 67, 76
 CONVECTION,48, 60, 67
 DIRE,29, 30
 EINF,33, 48, 50, 67
 EMIS,33, 48, 50, 56, 67, 73
 EPAL,28, 29, 48, 60, 67
 ESUP,33, 48, 50, 67
 H,28, 32, 42, 44, 48, 50, 54, 56, 60, 67, 71, 73
 K,28, 31, 42, 44, 48, 50, 60, 63, 67, 76
 K1,29
 K11,30
 K2,29
 K21,30
 K22,30
 K3,29
 K31,30
 K32,30
 K33,30
 RADI,29, 30
 RAYONNEMENT,48, 67
 RHO,28, 29, 30, 48, 60, 63, 67, 76
 SECT,28, 48, 60, 67, 76

 THERMIQUE,48, 60, 67
MODE
 CONS,50
MODE,5, 48, 49, 50, 52, 56, 60, 67, 79
MODE
 CONS,19, 32, 56, 68, 73
 CONVECTION,42, 44, 50, 54, 56, 57, 60, 67, 71, 73,
 74
 CONVECTION,19
 CONVECTION INFERIEUR,42, 44, 50
 CONVECTION INFERIEURE,19
 CONVECTION SUPERIEUR,42, 44, 50
 CONVECTION SUPERIEURE,19
 RAYONNEMENT,19, 50, 56, 57, 73, 74
 THERMIQUE,60, 67
 THERMIQUE ISOTROPE,42
 THERMIQUE ISOTROPE,19, 44, 50, 63, 76
MODELE voir PASAPAS
MOT,5

N

NATURE,36 voir MANU
NOMC,36, 38, 42, 44, 50, 63
NONLINEAIRE,52, 54, 56, 68

O

OPTI,18, 79
OPTI
 AXIS,18
 DIME,18
 ELEM,57, 74
 PLAN,18
 TRID,18
ORTHOTROPE voir MODE

P

PAS,54, 71
PASAPAS,5, 38, 48, 52, 54, 56, 60, 62, 64, 67, 69, 71,
73, 76, 79, 82, 83, 84
PASAPAS
 BLOCAGES_THERMIQUES,48, 52, 60, 64, 67
 CARACTERISTIQUES,48, 52, 56, 60, 64, 67, 73, 76
 CELSIUS,49, 51, 56, 67, 73
 CHARGEMENT,48, 52, 56, 60, 64, 67, 73, 76
 MASSE_CONSTANTE,60, 64, 67
 MODELE,48, 51, 56, 60, 64, 67, 73, 76
 NONLINEAIRE,48
 PHASE,67, 68, 76
 PHASE CHALEUR LATENTE,68, 76
 PHASE SOUSTYPE,68, 76
 PHASE TPHASE1,68, 76
 PHASE TPHASE2,68, 76
 PROCEDURE_THERMIQUE,48, 52, 54, 56, 60, 64,
 68, 76
 RAYONNEMENT,49, 52, 56, 58, 67, 68, 73, 74, 75
 MODELE,75
 RAYONNEMENT CAVITE,49
 RAYONNEMENT CONVEXE,49, 58, 68, 75
 RAYONNEMENT FERME,49, 58, 68, 75
 RAYONNEMENT INFINI,49
 RAYONNEMENT MODELE,49, 52, 56, 58, 68, 73,
 75

RAYONNEMENT TYPE,49, 52, 56, 58, 68, 73, 74,
75
RELAXATION_THETA,49, 52, 54, 56, 58, 60, 68
SOUS_RELAXATION,49, 52, 54, 56, 58, 68
SOUS-RELAXATION,61
TABL,56, 64, 67, 73
TEMPERATURES,48, 49, 52, 60, 61, 64, 67, 68, 69
TEMPERATURES,54, 71
TEMPS,49, 61, 68
TEMPS_CALCULES,49, 52, 54, 56, 58, 61, 62, 64,
68, 69, 76
TEMPS_SAUVES,49, 61, 62, 68, 69

PHASE voir PASAPAS

PLAN voir OPTI

PROG,31, 50, 52, 54, 62, 64, 69, 71, 76

PSCA,36

Q

Q voir CHAR, MANU

QINF voir MANU

QSUP voir MANU

R

RADI,30 voir MATE

RAYONNEMENT voir PASAPAS voir MODE

REAC,36

RELA,34, 38, 40, 42, 44, 51, 63

RELA

MAXI,34

MINI,34

T,34

TINF,34

TSUP,34

RELAXATION voir PASAPAS

REPE,54, 71

REPR,62, 69

RESO,5, 36, 41, 43, 45, 79

RESO

GRAD,41

RESU,36

RHO voir MATE

RIGI voir EXTR, SUPE

S

SAUV,62, 69

SECT voir MATE, CARA

SI,57, 74

SOUR,36, 39, 40, 43, 45, 47, 51, 59, 65

SUPE,41 voir FLUX

SUPE

CHAR,45

DEPL,46

RIGI,45

SUPERIEURE voir MODE

T

T voir BLOQ, CONV, MANU, RELA

TE voir CHAR

TEMPERATURES voir PASAPAS

TEMPS,47, 59 voir PASAPAS

THERMIQUE voir MODE

TIMP voir CHAR

TINF voir BLOQ, MANU, RELA

TRID voir OPTI

TSUP voir BLOQ, MANU, RELA

TYPE,77