

**Manuel d'Utilisation**  
**Fascicule U2.09 : Outils et Solutions Métiers**  
**Document : U2.09.03**

# **Notice d'utilisation du calcul et du post-traitement d'une étude mécanique suivant le RCCM**

---

## **Résumé :**

Ce document est une aide à l'utilisation du post-traitement selon le RCCM.

Le chapitre 1 décrit le post-traitement de fatigue suivant le RCCM B3600, c'est-à-dire sur une analyse de type poutre des tuyauteries (TYPE\_RESU\_MECA=' TUYAUTERIE' ).

Les chapitres 2 et 3 se réfèrent au post-traitement de fatigue suivant le RCCM B3200, suite à un calcul 2D ou 3D massif d'un composant ou d'une zone particulière. Le chapitre 2 concerne l'analyse soumise à des transitoires quelconques, mécaniques ou thermiques en petit nombre (TYPE\_RESU\_MECA=' EVOLUTION' ).

Le chapitre 3 est relatif à l'analyse d'une zone de tuyauterie soumise à de nombreux chargements, issus des mêmes situations que les lignes de tuyauterie du chapitre 1 (TYPE\_RESU\_MECA=' UNITAIRE' ).

## Table des matières

1 Analyse réglementaire d'une ligne de tuyauterie à l'aide de POST_RCCM option FATIGUE_B3600 ....	3
1.1 Données disponibles .....	3
1.2 Maillages à prévoir.....	7
1.3 Calculs mécaniques.....	7
1.3.1 Caractéristiques des matériaux.....	7
1.3.2 Caractéristiques élémentaires.....	8
1.3.3 Chargements et conditions aux limites .....	8
1.3.3.1 Conditions aux limites communes .....	8
1.3.3.2 Définitions des chargements.....	9
1.3.4 Calculs statiques .....	9
1.3.5 Calculs sismiques.....	9
1.3.5.1 Calcul modal .....	10
1.3.5.2 Réponse inertielle .....	10
1.4 Calculs thermiques .....	11
1.4.1 Caractéristiques thermiques.....	11
1.4.2 Calculs des transitoires .....	11
1.4.3 Extraction des résultats .....	12
1.5 Post traitement suivant le RCCM .....	12
2 Calcul détaillé complet d'un composant quelconque et analyse réglementaire B3200 à l'aide de POST_RCCM.....	15
2.1 Calcul du composant .....	15
2.2 Définition des segments et extraction des contraintes.....	15
2.3 Calcul des différents critères à l'aide de POST_RCCM .....	16
2.3.1 Option PM_PB .....	16
2.3.2 Option SN.....	17
2.3.2.1 Calcul de $S_n^*$ .....	17
2.3.3 Option FATIGUE_ZH210 .....	18
2.4 Description des tables produites .....	19
2.4.1 Option PM_PB .....	19
2.4.2 Option SN.....	19
2.4.3 Option FATIGUE.....	20
3 Étude réglementaire d'une zone particulière d'un composant soumis à de nombreux chargements.....	21
3.1 Définition de la zone d'analyse .....	21
3.2 Calcul préliminaire des efforts aux limites de la zone d'analyse .....	22
3.3 Caractéristiques des matériaux .....	22
3.4 Caractéristiques élémentaires des éléments discrets ou linéiques .....	23
3.5 Conditions aux limites pour le calcul des chargements unitaires.....	23
3.6 Calculs statiques.....	24
3.7 Relevés des contraintes .....	24
3.8 Calculs thermomécaniques .....	25
3.9 POST_RCCM sur chaque segment .....	26
3.10 Description des tables produites .....	29
4 Bibliographie .....	30

# 1 Analyse réglementaire d'une ligne de tuyauterie à l'aide de POST\_RCCM option FATIGUE\_B3600

Le but de ce chapitre est de fournir les indications pour réaliser de A à Z un calcul d'une ligne de tuyauterie soumise à l'ensemble des chargements prévus à sa conception, et son analyse réglementaire par rapport au dommage de fatigue suivant le RCC-M B3600.

Nous prendrons pour exemple la ligne VVP étudiée dans [bib1]. Celle-ci fait l'objet du test RCCM02 [V3.01.113] en ce qui concerne l'analyse à la fatigue suivant RCC-M B3600. Cette commande est décrite dans la documentation d'utilisation [U4.83.11]. Le détail des équations et critères est donné dans la documentation de référence [R7.04.03].

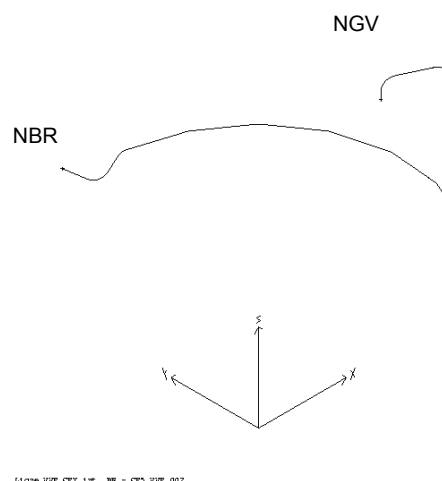
## 1.1 Données disponibles

Pour une ligne de tuyauterie donnée, on dispose généralement :

- de la géométrie filaire de la ligne,
- des caractéristiques géométriques des différentes sections de tuyauterie, et des composants (transitions d'épaisseurs, coudes, piquages, raccords à des gros composants),
- des chargements (mécaniques et transitoires thermiques) que doit subir la ligne au cours de son fonctionnement,
- du ou des matériaux composant la ligne (caractéristiques fonction de la température).

**Exemple (tiré du test RCCM02 [V3.01.113]) : données de modélisation de la ligne VVP :**

La ligne comporte 10 coudes. Elle est orientée depuis le nœud NGV jusqu'au nœud NBR



### Caractéristiques élémentaires :

Parties droites :

- R = 406.4 mm, EP = 32 mm
- Tubulure GV, R = 410 mm, EP = 38 mm ;
- Sortie BR, R = 444.4 mm, EP = 70 mm ;

Coudes :

- Groupe de mailles correspondant aux coudes : R = 406.4 mm ; EP = 34 mm ;
- Coefficient de flexibilité pour tous les coudes, cflex = 6.032 ;
- Rayons de cintrage des coudes : 1220 mm

De plus pour le calcul sismique, 6 éléments discrets (DIS\_T) sont ajoutés en 3 points de la ligne (1 DAB vertical et un horizontal par point d'ancrage). Ils ont pour raideurs :

$$K1 = 0.5 \cdot 10^8 \text{ N/m}$$

$$K2 = 1.0 \cdot 10^8 \text{ N/m}$$

### Caractéristiques des matériaux

La ligne VVP est en acier A48. Les calculs des efforts sont effectués à différentes valeurs de température. On considère donc les propriétés des matériaux en fonction de la température :

Température (°C)	Module d'Young (GPa)	Coefficient de dilatation moyen (à partir de 20°C)
0.0	205	1.092e-05
20.0	204	1.092e-05
50.0	203	1.114e-05
100.0	200	1.15e-05
150.0	197	1.187e-05
200.0	193	1.224e-05
250.0	189	1.257e-05
300.0	185	1.289e-05
350.0	180	1.324e-05

Coefficient de Poisson : 0.3

Les caractéristiques utilisées pour l'analyse à la fatigue selon le RCC-M sont :

$$m=3$$

$$n=0.2$$

$$S_m = 133.6 \text{ MPa}$$

La courbe de WOHLER est définie par : (interpolation **logarithmique**) :

Salt (Mpa)	Nombre de cycles
0.01	1.E15
86	1000000
93	500000
114	200000
138	100000
160	50000
215	20000
260	10000
330	5000
440	2000
570	1000
725	500
1070	200
1410	100
1900	50
2830	20
4000	10

Les masses volumiques intègrent le calorifugeage :

Masse volumique (Kg/m3)	Ligne vide	Ligne pleine
Partie courante	8706.3	14200.0
Sortie BR	7850.	10295.7
Tubulure GV	8548.0	13500

Les caractéristiques thermiques sont fournies à la température moyenne du transitoire calculé :

Transitoire 2 : température moyenne = 273.5°C,  
Transitoire 6 : température moyenne = 281°C,

Température °C	273.5	281
Conductivité thermique (W/m.°C)	46.595	46.37
Capacité calorifique (J/m3.°C)	4.25 10 <sup>6</sup>	4.27 10 <sup>6</sup>

## Conditions aux limites et chargements

Les différents chargements mécaniques élémentaires considérés constituent les états stabilisés correspondant aux situations de conception de la ligne VVP :

### Chargements de dilatation thermique :

On effectue un calcul par chargement, qui combine les efforts de dilatation thermique contrariée dans la ligne à la température prescrite, à ceux provoqués par déplacement du GV :

Numéro de chargement	Température °C	Ux GV (mm)	Uy GV (mm)	Uz GV (mm)
1	10	0	0	0
2	287	0.046466	-0.0304945	0.076
3	274.5	0.046466	-0.0304945	0.072
4	272.5	0.046466	-0.0304945	0.072
5	286	0.046466	-0.0304945	0.076
6	275	0.046466	-0.0304945	0.072
7	290	0.046466	-0.0304945	0.077
8	284	0.046466	-0.0304945	0.077
10	256	0.0360129	-0.0245167	0.067
12	257	0.0360129	-0.0245167	0.067
14 (épreuve hydraulique)	20	0	0	0

**Conditions aux limites : pour tous les chargements précédents le nœud NBR est encasté.**

De plus, pour l'épreuve hydraulique les extrémités NGV et NBR sont bloquées et des supports – poids sont ajoutés pour ce chargement : ils sont modélisés par une condition DZ=0, appliquée en 7 nœuds.

Séisme : les spectres de plancher correspondant au SNA (séisme considéré pour la fatigue) sont :

Fréquence (Hz)	Accélération(g) Spectre de plancher horizontal (SNA)
1.0	0.18
2.2	1.56
3.0	1.56
10.0	0.513
20.0	0.281
25.0	0.245
50.0	0.245
Fréquence (Hz)	Accélération(g) Spectre de plancher vertical
1.0	0.11
2.0	0.21
3.0	0.265
4.0	0.31
6.4	0.31
9.0	0.21
10.0	0.17
25.0	0.1
50.0	0.1

Les déplacements d'ancrage associés sont :

- nœud NBR : Dx=4mm, Dy=7mm, Dz=5mm,
- nœud NGV : Dx=11.9mm, Dy=mm, Dz=1mm.

## Définition des situations :

Situation	Désignation	Nombre d'occurrences	Pression (Bar)	Numéro de chargement	Transitoire thermique
1	Passage Arrêt à froid – fonctionnement nominal	190	1 71.5	1 2	-
2	Fluctuations en régime permanent	1300000	58.9 57.6	3 4	2
3	Maintien niveau GV	4000	70 59	5 6	6
4	Fluctuations an arrêt à chaud	100000	73.4 68.1	7 8	2
5	Enveloppe des situations normales	16080	71.5 44	9 10	6
6	Enveloppe des situations perturbées	790	74.5 44	11 12	6
7	Séisme SNA	10 390 sous-cycles	-	Séisme	-
11	Epreuve hydraulique	13	112 1	14	-

**Transitoires thermiques** : deux transitoires « enveloppe » de l'ensemble des transitoires sont calculés. Il correspondent à une condition d'échange en peau interne du calcul axisymétrique définie par un coefficient d'échange  $H=30000W/m^2.°C$  et deux histoires de températures fluide :

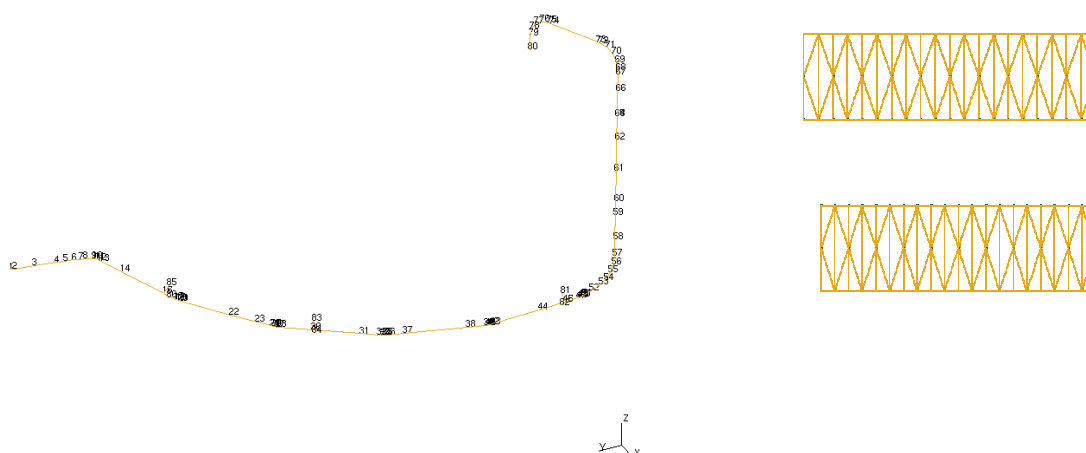
Transitoire 2		Transitoire 6	
Temps (s)	Température fluide (°C)	Temps (s)	Température fluide (°C)
0.0	274.5	0.0	272.0
10.0	274.5	11.0	272.0
310.0	272.5	20.0	290.0
610.0	274.5	40.0	290.0
910.0	272.5		

## 1.2 Maillages à prévoir

Deux types de maillages doivent être constitués :

- le maillage de la ligne, en éléments filaires (mailles SEG2),
- un maillage correspondant à chaque type particulier de géométrie pour les transitoires thermiques.

Par exemple pour le maillage filaire, les coudes sont discrétisés chacun en 4 éléments.



Les mailles composant le coude seront associées à la modélisation `POU_C_T`. Les parties droites seront affectées de la modélisation `POU_D_T`.

Remarque sur la discrétisation : en ce qui concerne les chargements statiques, la discrétisation en éléments `POU_D_T` n'a pas besoin d'être fine pour fournir des solutions précises [R3.08.01]. Par contre pour l'analyse dynamique, pour pouvoir obtenir des modes propres élevés avec une précision suffisante, il faut discrétiser plus finement. Par exemple, 4 éléments par partie droite sont généralement suffisants pour les 10 premières fréquences propres.

En ce qui concerne les maillages utilisés pour les calculs thermiques, il faudra veiller à mailler finement dans le sens de la conduction de la chaleur. Par exemple, en partie courante de tuyauterie, le maillage est une tranche de tube, modélisé en axisymétrie. Un seul élément suffit dans le sens axial. Les 2 maillages ci-dessus correspondent aux deux épaisseurs caractéristiques de la ligne.

Pour la modélisation, il est préférable (pour obtenir une solution correcte) d'utiliser les modélisations avec masse thermique diagonalisée (`AXIS_DIAG`, `3D_DIAG`).

## 1.3 Calculs mécaniques

### 1.3.1 Caractéristiques des matériaux

Les caractéristiques élastiques sont à fournir en fonction de la température (veiller à définir une plage de température suffisamment large pour couvrir l'ensemble des conditions thermiques vues par la ligne. Ceci est préférable à la définition des prolongements qui peut conduire à des aberrations). On peut utiliser le catalogue matériau qui regroupe en particulier les caractéristiques de tous les matériaux du RCCM.

Pour les calculs sismiques, il faut ajouter la masse volumique (intégrant le poids de l'eau et du calorifuge). Il faut également introduire les caractéristiques de fatigue : coefficients  $n$  et  $m$  pour le calcul de  $K_e$ , et courbe de Wöhler. Il est préférable pour cette dernière (étant donnée sa définition) de définir une interpolation logarithmique).

Par exemple, les données matériau pour la ligne VVP sont :

```
YOUNG=DEFI_FONCTION(NOM_PARA='TEMP',
VALE=(20.0,204000000000.0,50.0,203000000000.0,100.0,200000000000.0,...));

C_ALPHA=DEFI_FONCTION(NOM_PARA='TEMP',
VALE=(20.0,1.092e-05,50.0,1.114e-05,100.0,1.15e-05,...));
NU=DEFI_CONSTANTE(VALE=0.3);

# COURBE DE FATIGUE A48 (on définit Nadm en fonction de Salt)
WOHLER=DEFI_FONCTION(NOM_PARA='SIGM',
VALE=(86000000.0,1000000.0,
93000000.0,500000.0,
114000000.0,200000.0,
138000000.0,100000.0,
160000000.0,50000.0,
.....
INTERPOL='LOG',,);

RHOV = 8706.3;

MAT_A48V=DEFI_MATERIAU(ELAS_FO=_F(E=YOUNG, NU=NU,
RHO=RHOV,
TEMP_DEF_ALPHA=20.0,
ALPHA=C_ALPHA),
FATIGUE=_F(WOHLER=WOHLER, E_REFE=2.07E11),
RCCM=_F(SM=1.336E8,
N_KE=0.2,
M_KE=3.0),);
```

### 1.3.2 Caractéristiques élémentaires

Elles sont entièrement définies par AFPE\_CARA\_ELEM. En ce qui concerne les coudes, il est plus pratique dans AFPE\_CARA\_ELEM de fournir les orientations des arcs à l'aide de CENTRE ou POIN\_TANG. On peut vérifier (INFO=2) que les rayons de courbure recalculés par Aster correspondent bien aux rayons des coudes. Il est nécessaire de définir les coefficients de flexibilité (définis par exemple dans RCC-M B3600 [bib2]) correspondant à chaque coude. Par exemple :

```
CARA_POU=AFPE_CARA_ELEM(MODELE=MODELE,INFO=2,
POUTRE=( _F(GROUP_MA='TUYAU', SECTION='CERCLE',
CARA=('R','EP'), VALE=(RTUB,EPTUB)),
_F(GROUP_MA='L1', SECTION='CERCLE',
CARA=('R','EP'), VALE=(RGV,EPGV)),
....

DEFI_ARC=( _F(GROUP_MA='C3',CENTRE=(10.62,-4.9,30.78),COEF_FLEX=C_FLEX),
_F(GROUP_MA='C7',CENTRE=(...

DISCRET=( _F(GROUP_MA='RIG1',CARA='K_T_D_L', VALE=(0.0,0.0,0.0)),
_F(GROUP_MA='RIG2',...
```

### 1.3.3 Chargements et conditions aux limites

#### 1.3.3.1 Conditions aux limites communes

En général il existe des conditions aux limites communes à tous les chargements (par exemple un encastrement correspondant au passage de la ligne par un point fixe). Par exemple :

```
BLOCBR=AFPE_CHAR_MECA(MODELE=MODELE,
DDL_IMPO=( _F(GROUP_NO='NBR',
DX=0.0,
DY=0.0,
DZ=0.0,
DRX=0.0,
DRY=0.0,
DRZ=0.0),
```



### 1.3.3.2 Définitions des chargements

Les états stabilisés définissant les situations sont en général la combinaison de chargements purement mécaniques (poids propre, déplacement imposé par un composant en un ou plusieurs points du circuit) et des dilatations thermiques (on ne considère pas ici le transitoire thermique mais seulement les efforts dus à la dilatation contrariée de la ligne pour chaque état stabilisé de chaque situation). Ceci nécessite de définir des champs de température constants par zones ou pour toute la ligne, à l'aide de CREA\_CHAMP. Par exemple, l'état stabilisé numéro 5 est entièrement défini par les chargements suivants :

```
CHAR1=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=MODELE,  
                      DDL_IMPO=_F(GROUP_NO='NGV',  
                                   DX=0.046466,  
                                   DY=-0.0304945,  
                                   DZ=0.076,  
                                   DRX=0.0,  
                                   DRY=0.0,  
                                   DRZ=0.0),),);  
  
TEMP286=CREA_CHAMP( TYPE_CHAM='NOEU_TEMP_R',  
                    OPERATION='AFFE', MAILLAGE=MAILL,  
                    AFFE=_F(TOUT='OUI', NOM_CMP='TEMP', VALE=286.0),),);  
  
CHT286=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=MODELE,  
                      TEMP_CALCULEE=TEMP286,);
```

### 1.3.4 Calculs statiques

Un calcul (à l'aide de MECA\_STATIQUE) est à effectuer pour chaque état stabilisé, en ajoutant le calcul des efforts en option de calcul. Ici pour le chargement numéro 5 :

```
RMECA5=MECA_STATIQUE(MODELE=MODELE, CHAM_MATER=CHAMPMVA, CARA_ELEM=CARA_POU,  
                     EXCIT=( _F(CHARGE=BLOCBR, ),  
                             _F(CHARGE=CHT286, ),  
                             _F(CHARGE=CHAR1, ), ),  
                     OPTION='EFGE_ELNO_DEPL', );
```

### 1.3.5 Calculs sismiques

Les calculs sismiques sont composés de calculs inertiels, et de calculs statiques de déplacements d'ancrages. Ces derniers sont similaires aux calculs statiques précédemment décrits. On doit effectuer un calcul par composante de déplacement pour chaque ancrage. Par exemple, dans le cas de la ligne VVP, il faut un calcul pour chaque composante de déplacement imposé sur le nœud NBR, et de même sur le nœud NGV :

```
ANC_BRDX=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=MODELE,  
                        DDL_IMPO=_F(GROUP_NO='NBR',  
                                    DX=4.0E-3, DY=0.0, DZ=0.0,  
                                    DRX=0.0, DRY=0.0, DRZ=0.0),),);  
  
RANCBRD=MECA_STATIQUE(MODELE=MODELE, CHAM_MATER=CHAMPMVA,  
                      CARA_ELEM=CARA_POU,  
                      EXCIT=( _F(CHARGE=BLOCNV, ),  
                              _F(CHARGE=CHT20, ),  
                              _F(CHARGE=ANC_BRDX, ), ),  
                      OPTION='EFGE_ELNO_DEPL', );
```

Le calcul de la réponse inertielle demande plusieurs étapes :

### 1.3.5.1 Calcul modal

Celui peut être facilement effectué à l'aide de `MACRO_MATR_ASSE` et `MODE_ITER_SIMULT`. Il faut veiller à prendre en compte suffisamment de modes propres (ici 11). Ici le calcul modal est effectué avec la ligne pleine d'eau (masses volumiques modifiées) et les DAB bloqués.

```
MACRO_MATR_ASSE(MODELE=MODELE,
                CHAM_MATER=CHAMPMVA,
                CARA_ELEM=CARA_DAB,
                CHARGE=(CHT287,BLOCGVBR),
                NUME_DDL=CO('NUME'),
                MATR_ASSE=(_F(MATRICE=CO('RIGIDITE'), OPTION='RIGI_MECA'),
                           _F(MATRICE=CO('MASSE'), OPTION='MASS_MECA')));

TABL_MAS=POST_ELEM(MASS_INER=_F(TOUT='OUI'), MODELE=MODELE,
                  CHAM_MATER=CHAMPMVA, CARA_ELEM=CARA_DAB);

MODE_MEC=MODE_ITER_SIMULT(MATR_A=RIGIDITE, MATR_B=MASSE,
                          CALC_FREQ=_F(OPTION='PLUS_PETITE', NMAX_FREQ=11));

MODE_MEC=CALC_ELEM(reuse =MODE_MEC, MODELE=MODELE,
                  CHAM_MATER=CHAMPMVA, CARA_ELEM=CARA_DAB,
                  OPTION='EFGE_ELNO_DEPL', RESULTAT=MODE_MEC,
                  EXCIT=(_F(CHARGE=BLOCGVBR),
                         _F(CHARGE= CHT287)));
```

### 1.3.5.2 Réponse inertielle

Il faut définir les spectres d'accélérogrammes imposés aux appuis. Le spectre horizontal est différent du spectre vertical dans l'exemple choisi : (attention aux unités choisies pour l'accélération : ici `COMB_SISM_MODAL` attend des accélérations en « g » cf. mot clé `ECHELLE` de `COMB_SISM_MODAL`) :

```
ACCE_XY=DEFI_FONCTION(NOM_PARA='FREQ',
                     VALE= (1.0,0.18,2.2,1.56,3.0,1.56,...),
                     INTERPOL='LOG', PROL_DROITE='CONSTANT', PROL_GAUCHE='CONSTANT');

ACCE_Z=DEFI_FONCTION(NOM_PARA='FREQ',
                     VALE= (1.0,0.11,2.0,0.21,3.0,0.265,...),
                     INTERPOL='LOG', PROL_DROITE='CONSTANT', PROL_GAUCHE='CONSTANT');

SPECT_XY=DEFI_NAPPE(NOM_PARA='AMOR', PARA=(0.015,0.02,0.025),
                   FONCTION=(ACCE_XY,ACCE_XY,ACCE_XY),
                   INTERPOL=('LIN','LOG'));

SPECT_Z=DEFI_NAPPE(NOM_PARA='AMOR', PARA=(0.015,0.02,0.025),
                   FONCTION=(ACCE_Z,ACCE_Z,ACCE_Z),
                   INTERPOL=('LIN','LOG'));

MODE_STA=MODE_STATIQUE(MATR_RIGI=RIGIDITE,MATR_MASS=MASSE,
                      PSEUDO_MODE=_F(AXE=('X','Y','Z')));

MODE_STA=CALC_ELEM(reuse =MODE_STA,MODELE=MODELE,CHAM_MATER=CHAMPMVA,
                  CARA_ELEM=CARA_DAB, OPTION='EFGE_ELNO_DEPL',
                  RESULTAT=MODE_STA,EXCIT=(...))

SISM_SPE=COMB_SISM_MODAL(MODE_MECA=MODE_MEC, MODE_CORR=MODE_STA,
                        AMOR_REDUIT=0.02, MASS_INER=TABL_MAS,
                        CORR_FREQ='NON',
                        EXCIT=_F(MONO_APPUI='OUI',
                                TRI_SPEC='OUI',
                                SPEC_OSCI=(SPECT_XY,SPECT_XY,SPECT_Z),
                                ECHELLE=(9.81,9.81,9.81)),
                        COMB_MODE=_F(TYPE='SRSS'),
                        COMB_DIRECTION=_F(TYPE='QUAD'),
                        OPTION=('DEPL','EFGE_ELNO_DEPL'));
```

## 1.4 Calculs thermiques

Les calculs thermiques transitoires ont pour but, dans le cas du RCCM B3600, d'évaluer les gradients de température maximum au cours des transitoires, dans chaque partie de la ligne. Pour les parties courantes des tuyauteries, en théorie, un calcul de conduction thermique 1D suffirait. En pratique, on pourra effectuer un calcul axisymétrique d'une tranche de tube (la longueur axiale maillée n'ayant aucune importance). Pour les zones plus complexes, il peut être nécessaire d'effectuer un maillage 2D ou 3D précis de la zone.

Pour alléger les fichiers de commandes, il peut être utile de construire chaque modélisation thermique dans un fichier propre, qui sera inclus (commande `INCLUDE`) dans le fichier de commande principal au moment de l'exécution.

### 1.4.1 Caractéristiques thermiques

Elles peuvent être extraites du catalogue `MATERIAU` du `Code_Aster`. Elles peuvent être fonction de la température (auquel cas il faudra effectuer un calcul thermique non linéaire), ou bien interpolées à la température moyenne de chaque transitoire à calculer (pratique courante, mais à valider en toute rigueur). Par exemple, pour chacun des 2 transitoires de la ligne VVP :

```
# COEFS MOYENS DES COEF A 273.5
MATHER=DEFI_MATERIAU(THER=_F(LAMBDA=46.595, RHO_CP=4.25E6, ), );

CHMAT=AFFE_MATERIAU(MAILLAGE=MA,
                    AFFE=_F(TOUT='OUI', MATER=MATHER, ), );

# COEFS MOYENS DES COEF A 281
MATHER2=DEFI_MATERIAU(THER=_F(LAMBDA=46.37, RHO_CP=4.27E6, ), );

CHMAT2=AFFE_MATERIAU(MAILLAGE=MA,
                    AFFE=_F(TOUT='OUI', MATER=MATHER2, ), );
```

### 1.4.2 Calculs des transitoires

Ils sont souvent caractérisés par une histoire de température en peau interne de la tuyauterie (température fluide) et un coefficient d'échange. Il faudra veiller à ce que la discrétisation temporelle soit suffisamment fine pour bien « capter » les gradients de température (faire plusieurs essais).

```
COEFH=DEFI_CONSTANTE( VALE=3.E4, );

TR2=DEFI_FONCTION(NOM_PARA='INST', VALE=(0.0,274.,10.0,274.,310.0,272....), );

CHTH2=AFFE_CHAR_THER_F(MODELE=MOTHER,
                      ECHANGE=_F(GROUP_MA=('ECHAND','ECHANC', ),
                                COEF_H=COEFH, TEMP_EXT=TR2, ), );

LISTH2=DEFI_LIST_REEL(DEBUT=0.0,
                    INTERVALLE=( _F(JUSQU_A=10.0, PAS=10.0, ),
                                _F(JUSQU_A=310.0, PAS=10.0, ), _..., ), );

TEMP2=THER_LINEAIRE(SOLVEUR=_F(RENUM='MDA'), MODELE=MOTHER,
                  CHAM_MATER=CHMAT, EXCIT=_F(CHARGE=CHTH2, ),
                  INCREMENT=_F(LIST_INST=LISTH2, ),
                  TEMP_INIT=_F( VALE=274.5, ), );
```

### 1.4.3 Extraction des résultats

En vue de l'analyse avec `POST_RCCM`, il faut extraire les valeurs et les moyennes des températures, pour tous les instants calculés, sur un segment défini par `INTE_MAIL_2D` (ou un groupe de nœuds, réorienté à l'aide de `DEFI_GROUP`, `OPTION = 'SEGM_DROI_ORDO'`) allant de la peau interne vers la peau externe. Par exemple :

```
TABTH2D=POST_RELEVE_T(ACTION=_F(INTITULE='temp2', GROUP_NO='BASD',
                                RESULTAT=TEMP2, NOM_CHAM='TEMP', NOM_CMP='TEMP',
                                OPERATION='EXTRACTION',),);

TABMO2D=POST_RELEVE_T(ACTION=_F(INTITULE='temp2', GROUP_NO='BASD',
                                RESULTAT=TEMP2, NOM_CHAM='TEMP', NOM_CMP='TEMP',
                                OPERATION='MOYENNE',),);
```

## 1.5 Post traitement suivant le RCCM

Il ne reste plus qu'à appeler `POST_RCCM` avec l'option B3600, en fournissant [U4.83.11] :

- la géométrie de la ligne de tuyauterie,
- le champ de matériau : c'est la carte des matériaux affectés aux groupes de mailles du maillage par `AFFE_MATERIAU` auquel il faut ajouter la courbe de fatigue, `E_REFE`, `m` et `n` (mots-clés `RCCM`),
- `AFFE_CARA_ELEM` permet d'affecter les caractéristiques élémentaires,
- des indices de contraintes (en chaque nœud du maillage),
- le scénario de fonctionnement contenant la liste des situations :
  - pour chaque situation :
    - nombres d'occurrences de chaque situation (donc de chaque état stabilisé),
    - pression et température moyenne de chaque état stabilisé,
    - liste des chargements mécaniques (caractérisés par un numéro) de chaque état stabilisé,
    - le groupe d'appartenance de la situation,
    - le transitoire thermique associé,
- les résultats des calculs pour chaque chargement mécanique (y compris le séisme), (repéré par son numéro, avec pour info le nom du cas de charge) : champ par éléments aux nœuds d'efforts généralisés, pour chaque chargement (`EFGE_ELNO_DEPL`, ou `SIEF_ELNO_ELGA`),
- pour chaque nœud, une référence à un résultat thermique défini ci-dessous,
- les résultats des calculs thermiques : les calculs EF 2D ou 3D qui donnent ces infos dépendent à la fois de la géométrie et du transitoire. On a donc un calcul thermique par type de jonction, et par type de transitoire.

Pour achever l'exemple de la ligne VVP, l'appel à `POST_RCCM` est le suivant (`INFO=2` permet d'obtenir les détails des calculs) :

```
TBRCCM1=POST_RCCM (OPTION='FATIGUE_B3600',INFO=2,
                   CHAM_MATER=CHAMPMVA, MODELE=MODELE, CARA_ELEM=CARA_POU,
# zone d'analyse
    ZONE_ANALYSE=_F( MAILLE = ('M1','M2'), ),
# résultats mécaniques (calculés avec MECA_STATIQUE)
    RESU_MECA=(
        _F(NUM_E_CHAR=1,
            NOM_CHAR='ETAT 1 SITUATION 1',
            TOUT_ORDRE='OUI',RESULTAT=RMECA1,
            NOM_CHAM='EFGE_ELNO_DEPL',),
        _F(NUM_E_CHAR=2,
            NOM_CHAR='ETAT 2 SITUATION 1',
            TOUT_ORDRE='OUI',RESULTAT=RMECA2_9,
            NOM_CHAM='EFGE_ELNO_DEPL',),
        .....
    )
```

Titre : Notice d'utilisation du calcul et du post-traitement RCCM  
Auteur(s) : E. GALENNE, J.M. PROIX, M. ABBAS

Date : 22/02/06  
Clé : U2.09.03-B1 Page : 13/30

```
# Séisme réponse inertielle (COMB_SISM_MODAL)

_F(NUME_CHAR=1000,
  NOM_CHAR='SNA',
  TYPE_CHAR='SEISME',
  RESULTAT=SISM_SPE,
  NOEUD_CMP=('COMBI','QUAD'),
  NOM_CHAM='EFGE_ELNO_DEPL'),

# déplacement d'ancrage au niveau sortie BR suivant DX

_F(NUME_CHAR=1001,
  NOM_CHAR='SNA DEPL ANC BR DX',
  TYPE_CHAR='SEISME',
  TOUT_ORDRE='OUI', RESULTAT=RANCBRD,
  NOM_CHAM='EFGE_ELNO_DEPL'),

...

),

# indices de contraintes
INDI_SIGM=(
  _F(TOUT='OUI', TYPE_ELEM_STANDARD='DRO'),
  _F(C1=1.0,
    K1=1.10,
    C2=1.0,
    K2=1.10,
    C3=0.60,
    K3=1.10,
    MAILLE=('M1'), NOEUD=('N79'),
    TYPE_ELEM_STANDARD='COU'),
  ...

),

# résultats thermiques
RESU_THER=(
# résultats sur les tubes droits transitoire 2
_F(NUME_RESU_THER=12,
  TABL_RESU_THER=TABTH2D,
  TABL_MOYE_THER=TABMO2D,
  GROUP_MA='POUDT'),
# résultats sur les tubes droits transitoire 6
_F(NUME_RESU_THER=16,
  TABL_RESU_THER=TABTH6D,
  TABL_MOYE_THER=TABMO6D,
  GROUP_MA='POUDT'),
# résultats sur les coudes transitoire 2
_F(NUME_RESU_THER=22,
  TABL_RESU_THER=TABTH2C,
  TABL_MOYE_THER=TABMO2C,
  GROUP_MA='POUCT'),
# résultats sur les coudes transitoire 6
_F(NUME_RESU_THER=26,
  TABL_RESU_THER=TABTH6C,
  TABL_MOYE_THER=TABMO6C,
  GROUP_MA='POUCT'),
),

# les situations
SITUATION=(
_F(NB_OCCUR=190, NUME_SITU=1,
  NOM_SITU='Passage arrêt a froid -
fonctionnement nominal',
  NUME_GROUPE=1,
  PRES_A=1.0E5,
  PRES_B=71.5E5,
  TEMP_REF_A=10.0,
  TEMP_REF_B=287.0,
  CHAR_ETAT_A=1,
  CHAR_ETAT_B=2),
)
```

```

_F(NB_OCCUR=1300000, NUME_SITU=2,
  NOM_SITU='fluctuations en régime permanent',
  NUME_GROUPE=1,
  PRES_A=58.9E5,
  PRES_B=57.6E5,
  TEMP_REF_A=274.5,
  TEMP_REF_B=272.5,
  CHAR_ETAT_A=3,
  CHAR_ETAT_B=4,
  NUME_RESU_THER=(12,22),),

_F(NB_OCCUR=10,
  NB_CYCL_SEISM=390,
  NUME_SITU=7,
  NOM_SITU='Seisme SNA',
  COMBINABLE='OUI',
  NUME_GROUPE=1,
  CHAR_ETAT_A=(1000,1001,1002,1003,1004,1005,1006),),

_F(NB_OCCUR=13,
  NUME_SITU=11,
  NOM_SITU='Epreuve hydraulique',
#   NUME_GROUPE=2,
  NUME_GROUPE=1,
  PRES_A=112.0E5,
  PRES_B=1.0E5,
  TEMP_REF_A=20.0,
  TEMP_REF_B=10.0,
  CHAR_ETAT_A=1,
  CHAR_ETAT_B=14,),

),

);

```

Il ne reste plus qu'à imprimer la table produite :

```
IMPR_TABLE(TABLE=TBRCCM1,);
```

On obtient alors :

TABL_POST_RCCM								
MAILLE	TYPE_MAILLE	NOEUD	SM	SN_MAX	SN/3SM	SALT_MAX	FACT_USAGE_CUMU	
M1	DRO	N80	1.33600E+08	1.35615E+08	3.38360E-01	7.44376E+07	4.58400E-03	
M1	COU	N79	1.33600E+08	1.35207E+08	3.37342E-01	8.15106E+07	5.58793E-03	
M2	COU	N79	1.33600E+08	1.50176E+08	3.74690E-01	8.69347E+07	6.30413E-03	
M2	DRO	N78	1.33600E+08	1.49870E+08	3.73926E-01	8.05593E+07	5.37650E-03	

## 2 Calcul détaillé complet d'un composant quelconque et analyse réglementaire B3200 à l'aide de POST\_RCCM

Ce type d'analyse est justifié lorsque l'on veut analyser un composant soumis à un ou à peu de transitoires (et pas de séisme), en vue de vérifier les différents critères du RCC-M B3200 (déformation excessive, déformation progressive, fatigue suivant l'annexe ZH210).

Si on souhaite analyser un composant à la fatigue, pour l'ensemble des situations auxquelles il sera soumis, et en particulier au séisme, il est préférable d'utiliser la méthode décrite au chapitre suivant.

Ce type d'analyse ne fonctionne que pour les modélisations de milieux continus 2D (D\_PLAN, C\_PLAN, AXIS) ou 3D.

On prendra pour exemple les tests RCCM01, et SSLV100.

### 2.1 Calcul du composant

Il s'agit ici d'effectuer le calcul direct du composant, pour le ou les chargements dont on veut évaluer les critères.

Pour modéliser les coudes ou les piquages, il est commode d'utiliser les outils ASCOUF (macros commandes MACR\_ASCOUF\_MAIL et MACR\_ASCOUF\_CALC) et ASPIC (MACR\_ASPIC\_MAIL et MACR\_ASPIC\_CALC).

A l'issue de ces calculs, on dispose d'un certain nombre de concepts résultats, thermo-élastiques 2D ou 3D, produits par MECA\_STATIQUE ou STAT\_NON\_LINE, et pour lesquels on a calculé l'option SIGM\_ELNO\_DEPL (en prenant soin dans CALC\_ELEM de fournir la charge contenant les températures) ou mieux : SIEF\_ELNO\_ELGA (CALC\_ELEM).

Par exemple (RCCM01) :

```
RESU2=MECA_STATIQUE( MODELE=MO,          CHAM_MATER=CHMAT,
                      LIST_INST=LINST,
                      EXCIT=( _F( CHARGE = CHTHER ),
                               _F( CHARGE = CHMEC, FONC_MULT = FCTMUL ) ),
                      OPTION=( 'SIGM_ELNO_DEPL',
                                )
)
```

### 2.2 Définition des segments et extraction des contraintes

Il s'agit d'extraire, sur chaque segment à étudier, les contraintes, pour chaque transitoire. Rappelons que les critères du RCC-M B3200 sont à vérifier pour l'ensemble des segments envisageables, traversant le composant de la peau interne jusqu'à la peau externe. Le choix du segment maximisant les critères est à la charge de l'utilisateur. Pour une géométrie complexe, celui-ci devra donc calculer un certain nombre de segments.

En pratique, dans *Code\_Aster*, plusieurs méthodes sont possibles pour définir les segments d'analyse puis y extraire les contraintes :

- la première consiste à utiliser les commandes INTE\_MAIL\_2D ou INTE\_MAIL\_3D, suivant la dimension géométrique du problème, pour définir un segment quelconque passant au travers du maillage puis à extraire les contraintes par POST\_RELEVE\_T :

```
LIGNE1=INTE_MAIL_2D( MAILLAGE=MA,
                     DEFI_SEGMENT=_F( ORIGINE   = ( -1.0, 0.5, ),
                                       EXTREMITE = ( 1.0, 0.5, ) ),
                     INFO=2
)
```

```
TAB2=POST_RELEVE_T( ACTION=_F( INTITULE = 'LIGNE',  
                                CHEMIN = LIGNE1,  
                                RESULTAT = RESU2,  
                                NOM_CHAM = 'SIGM_ELNO_DEPL',  
                                OPERATION = 'EXTRACTION',  
                                TOUT_CMP = 'OUI', ), )
```

- la seconde méthode consiste à utiliser un groupe de nœuds préexistant dans le maillage, définissant un segment. Cette méthode nécessite obligatoirement de réordonner au préalable le groupe de nœuds, pour que les nœuds le composant soient rangés de la peau interne vers la peau externe :

```
MA=DEFI_GROUP(reuse=MA, MAILLAGE=MA,  
              CREA_GROUP_NO=( _F( OPTION = 'SEGM_DROI_ORDO',  
                                   NOM = 'LIGNE',  
                                   GROUP_NO='GN1',  
                                   NOEUD_ORIG = 'N22',  
                                   NOEUD_EXTR = 'N12',  
                                   PRECISION = 1.E-03,  
                                   CRITERE = 'RELATIF' )
```

```
TAB2=POST_RELEVE_T( ACTION=_F( INTITULE = 'LIGNE',  
                                GROUP_NO = LIGNE,  
                                RESULTAT = RESU2,  
                                NOM_CHAM = 'SIGM_ELNO_DEPL',  
                                OPERATION = 'EXTRACTION',  
                                TOUT_CMP = 'OUI', ), )
```

- la dernière méthode consiste à utiliser la macro-commande `MACR_LIGN_COUPE` pour définir le segment d'analyse à partir de ses extrémités et pour extraire les contraintes :

```
MACR_LIGN_COUPE(RESULTAT=RESU2,  
                 NOM_CHAM='SIGM_ELNO_DEPL',  
                 MODELE=MO,  
                 LIGN_COUPE=_F(NB_POINTS=5,  
                                COOR_ORIG=( -1.0, 0.5, ),  
                                COOR_EXTR=( 1.0, 0.5, ),  
                                TABLE=CO( 'TAB2' ), ), )
```

## 2.3 Calcul des différents critères à l'aide de POST\_RCCM

Les critères disponibles sont :

- des critères de niveau 0 par l'option `PM_PB`,
- des critères de niveau A (hors fatigue) par l'option `SN`,
- des critères de fatigue (également de niveau A) par l'option `FATIGUE_ZH210`.

### 2.3.1 Option `PM_PB`

Option permettant de calculer les critères de niveau 0 qui visent à prémunir le matériel contre les dommages de déformation excessive, d'instabilité plastique et d'instabilité élastique et élastoplastique. Ces critères nécessitent le calcul des contraintes équivalentes de membrane  $P_m$ , de membrane locale  $P_l$ , de flexion  $P_b$  et de membrane plus flexion  $P_m + P_b$ . Les points de calcul sont les deux extrémités du segment d'analyse. Si plusieurs segments d'extraction ont été utilisé pour définir une même table de contraintes, le calcul se fait successivement pour chacun d'entre eux.



En chaque point extrémité du segment d'analyse de longueur  $l$ , on calcule :

$$Pm = \max_t \left( \sigma_{ij}^{moy} \right)_{Eq.Tresca} \quad Pb = \max_t \left( \sigma_{ij}^{fle} \right)_{Eq.Tresca} \quad Pm + Pb = \max_t \left( \sigma_{ij}^{lin} \right)_{Eq.Tresca}$$

$$\text{avec} \quad \sigma_{ij}^{moy} = \frac{1}{l} \int_0^l \sigma_{ij} ds, \quad \sigma_{ij}^{fle} = \frac{6}{l^2} \int_0^l \left( s - \frac{l}{2} \right) \sigma_{ij} ds, \quad \sigma_{ij}^{lin} = \sigma_{ij}^{moy} \pm \sigma_{ij}^{fle}$$

Les valeurs limites sont  $S_m$  et  $1.5 S_m$ ,  $S_m$  étant la contrainte admissible fonction du matériau et de la température, donnée par le mot-clé `SM` du mot-clé `RCCM` dans `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01].

**Remarque :**

Le calcul de  $PM$  et  $PMPB$  se fait à partir des contraintes primaires uniquement, donc hors contraintes d'origine thermique. Si `TABL_SIGM_THER` est renseigné, on suppose que le résultat indiqué dans `TABL_RESU_MECA` correspond à un calcul thermomécanique et on lui soustrait donc les contraintes thermiques. Si seul `TABL_RESU_MECA` est renseigné, le calcul se fait directement à partir des contraintes indiquées dans la table.

### 2.3.2 Option `SN`

Option permettant de calculer les critères de niveau A (hors fatigue) qui visent à prémunir le matériel contre les dommages de déformation progressive. Ils nécessitent le calcul de l'amplitude de variation de contrainte linéarisée en un point, notée  $S_n$ .

Si l'utilisateur le demande (présence de l'opérande `TABL_SIGM_THER`) on effectue aussi le calcul de  $S_n^*$ . Les points de calcul sont les deux extrémités du segment d'analyse. Si plusieurs segments d'extraction ont été utilisé pour définir une même table de contraintes, le calcul se fait successivement pour chacun d'entre eux.

En chaque point extrémité de ce segment de longueur  $l$ , on calcule :

$$Sn = \max_{t_1} \left( \max_{t_2} \left( \sigma_{ij}^{lin}(t_1) - \sigma_{ij}^{lin}(t_2) \right) \right)_{Eq.Tresca}$$

$$\text{avec} \quad \sigma_{ij}^{moy} = \frac{1}{l} \int_0^l \sigma_{ij} ds, \quad \sigma_{ij}^{fle} = \frac{6}{l^2} \int_0^l \left( s - \frac{l}{2} \right) \sigma_{ij} ds, \quad \sigma_{ij}^{lin} = \sigma_{ij}^{moy} \pm \sigma_{ij}^{fle}$$

avec  $t_1$  et  $t_2$  parcourant l'ensemble des instants du (ou des) transitoires. La valeur limite de  $S_n$  est  $3.S_m$ ,  $S_m$  étant la contrainte admissible fonction du matériau et de la température, donnée par le mot-clé `SM` du mot-clé `facteur RCCM` dans `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01].

**Remarque :**

Le mot-clé `TABL_RESU_MECA` peut être répété plusieurs fois sous un seul mot-clé `TRANSITOIRE`. Pour le calcul de  $SN$  et  $SN^*$ , il n'y aura cependant pas de combinaison entre les situations ainsi définies : chaque table de contraintes sera traitée successivement.

#### 2.3.2.1 Calcul de $SN^*$

Si l'opérande `TABL_SIGM_THER` du mot clé `facteur TRANSITOIRE` est présent, on effectue aussi le calcul de  $S_n^*$  qui est égale à l'amplitude  $S_n$  calculée sans prendre en compte les contraintes de flexion d'origine thermique. On calcule pour chaque extrémité :

$$S_n^* = \max_{t_1} \left( \max_{t_2} \left( \left( \sigma_{ij}^{lin}(t_1) - \sigma_{ij}^{flecth}(t_1) \right) - \left( \sigma_{ij}^{lin}(t_2) - \sigma_{ij}^{flecth}(t_2) \right) \right) \right)_{Eq.Tresca}$$

$$\sigma_{ij}^{flecth} = \frac{6}{l^2} \int_0^l \left( s - \frac{l}{2} \right) \sigma_{ij}^{th} ds$$

$\sigma_{ij}^{th}$  provenant des contraintes fournies dans TABL\_SIGM\_THER.

Il faut, pour que le calcul soit cohérent et conforme au RCC-M, que les contraintes fournies dans TABL\_SIGM\_THER aient été obtenues avec un chargement thermique seul, sachant que le résultat donné par TABL\_RESU\_MECA peut être dû à une combinaison de ce chargement thermique avec d'autres chargements. Il faut donc que les instants de la table TABL\_SIGM\_THER correspondent à ceux de la table TABL\_RESU\_MECA.

### 2.3.3 Option FATIGUE\_ZH210

Option permettant de calculer le facteur d'usage résultant de la combinaison d'un ou plusieurs transitoires, suivant la méthode du RCC-M annexe ZH210.

L'amplitude de variation de contrainte en chaque extrémité du segment d'analyse est calculée à partir des tables de contraintes TABL\_RESU\_MECA, pour chaque combinaison d'instants appartenant au(x) transitoire(s) défini(s) par l'utilisateur. Puis on applique une méthode de combinaison et de cumul pour obtenir le facteur d'usage total. Parmi les différentes méthodes proposées par le RCC-M pour calculer le facteur d'usage en fatigue, celle de l'annexe ZH210 présente l'avantage de ne pas faire d'hypothèse sur les directions des contraintes principales. A partir des transitoires donnés par l'utilisateur (des résultats avec des numéros d'ordre ou des instants éventuellement précisés), le calcul se déroule en 3 phases :

- Définition d'états de chargement pour chaque transitoire
  - état de chargement  $k = \{\text{instant } t + \text{tenseur } \sigma(t) + \text{nombre d'occurrences } N_{occ} \text{ (celui du transitoire)}\}$
- A chaque extrémité du segment, pour deux états de chargement  $k$  et  $l$  :
  - calcul de  $S_p(k, l) = \text{amplitude de variation de contrainte (non linéarisée) entre les états } k \text{ et } l$ ,
  - calcul de  $S_n(k, l) = \text{amplitude de variation de contrainte linéarisée entre les états } k \text{ et } l$ ,
  - calcul de  $S_{alt}(k, l) = \frac{1}{2} E_c/E K_e(k, l) S_p(k, l)$ ,
  - par la courbe de fatigue de Wöhler en déduire  $N_{adm}(k, l)$ ,
  - facteur d'usage  $u(k, l) = N(k, l) / N_{adm}(k, l)$ ,
 
$$N(k, l) = \min(N_{occ}(k), N_{occ}(l))$$
- Méthode de combinaison
  - Données à chaque extrémité du segment
  - matrice carrée symétrique  $[u(k, l)]$  et vecteur  $N_{occ}(k)$  de dimension : le nombre total d'états de chargement
- Facteur d'usage total  $U$ 
  - $U = 0$
  - Recherche du facteur d'usage élémentaire maximum  $= u(m, n) = \max(u(k, l))$  sur toutes les combinaisons  $k, l$  où  $N_{occ}(k)$  et  $N_{occ}(l)$  non nuls
  - cumul :  $U = U + u(m, n)$ 
    - Si  $N_{occ}(m) < N_{occ}(n)$  alors
 
$$N_{occ}(n) = N_{occ}(n) - N_{occ}(m)$$

$$N_{occ}(m) = 0$$
    - Sinon,
 
$$N_{occ}(m) = N_{occ}(m) - N_{occ}(n)$$

$$N_{occ}(n) = 0$$

Cette méthode de combinaison des cycles est identique dans le cas uniaxial à la méthode RCCM de POST\_FATIGUE. Toutefois, dans POST\_FATIGUE, les instants (états de chargements) intermédiaires entre deux états extrêmes entre lesquels les contraintes varient linéairement sont éliminés.

Dans POST\_RCCM, qui traite des états de contraintes généraux, donc multiaxiaux, cette élimination automatique n'est pas effectuée. Elle est à la charge de l'utilisateur qui peut définir les instants correspondant aux états extrêmes par NUME\_ORDRE, INST ou LIST\_INST.

**Remarque :**

Le mot-clé `TABL_RESU_MECA` peut être répété plusieurs fois sous un seul mot-clé `TRANSITOIRE`. Pour le calcul en fatigue, les résultats contenus dans chaque table de contraintes seront combinés entre eux.

## 2.4 Description des tables produites

### 2.4.1 Option PM\_PB

Le calcul avec l'option `PM_PB` se fait de la manière suivante :

```
PMPB1=POST_RCCM( MATER=MAT,
                  TYPE_RESU='VALE_MAX',
                  OPTION='PM_PB',
                  TITRE='INST PM_PB, RESULTAT: RESU1',
                  TRANSITOIRE=_F( TABL_RESU_MECA = TAB1, )
                )
```

La table produite dans le cas `TYPE_RESU='DETAILS'`, imprimable avec la commande `IMPR_TABLE`, donne la valeur de chacun des paramètres calculés (SN, PB et PM-PB) pour chaque instant :

INTITULE	LIEU	SM	3SM	TABL_RESU	INST	PM	PB	PMB
Li1	ORIG	9.78000E+01	2.93400E+02	TAB1	0.00000E+00	4.69111E+01	2.38704E+01	2.87530E+01
Li1	ORIG	9.78000E+01	2.93400E+02	TAB1	1.00000E+00	4.69101E+01	2.38703E+01	2.87526E+01
Li1	ORIG	9.78000E+01	2.93400E+02	TAB1	2.00000E+00	4.69092E+01	2.38703E+01	2.87522E+01
Li1	ORIG	9.78000E+01	2.93400E+02	TAB1	3.00000E+00	4.69092E+01	2.38703E+01	2.87522E+01
Li1	ORIG	9.78000E+01	2.93400E+02	TAB1	4.00000E+00	4.69092E+01	2.38703E+01	2.87522E+01
Li1	EXTR	9.78000E+01	2.93400E+02	TAB1	0.00000E+00	4.69111E+01	2.38704E+01	7.05172E+01

...

Dans le cas `TYPE_RESU='VALE_MAX'`, seules les valeurs maximales de chacun des paramètres calculés et l'instant de calcul correspondant sont affichés pour l'origine et l'extrémité du segment:

INTITULE	LIEU	SM	3SM	TABL_RESU	INST_PM	PM	INST_PB	PB	INST_PMB	PMB
Li1	ORIG	9.78000E+01	2.93400E+02	TAB1	8.75000E+02	4.69111E+01	-	-	-	-
Li1	EXTR	9.78000E+01	2.93400E+02	TAB1	8.75000E+02	4.69111E+01	-	-	-	-
Li1	ORIG	9.78000E+01	2.93400E+02	TAB1	-	-	7.42000E+02	2.38704E+01	-	-
Li1	EXTR	9.78000E+01	2.93400E+02	TAB1	-	-	7.42000E+02	2.38704E+01	-	-
Li1	ORIG	9.78000E+01	2.93400E+02	TAB1	-	-	-	-	9.40000E+02	2.87530E+01
Li1	EXTR	9.78000E+01	2.93400E+02	TAB1	-	-	-	-	-	8.00000E+02

7.05172E+01

### 2.4.2 Option SN

Le calcul avec l'option `SN` se fait de la manière suivante :

```
SN1=POST_RCCM( MATER=MAT,
                TYPE_RESU='VALE_MAX',
                OPTION='SN',
                TITRE='INST SN, RESULTAT: RESU1',
                TRANSITOIRE=_F( TABL_RESU_MECA = TAB1,
                               TABL_SIGM_THER = TABTH )
              )
```

La table produite dans le cas `TYPE_RESU = 'DETAILS'` donne la valeur de chacun des paramètres calculés (SN et, éventuellement, SN\*) pour chaque combinaison d'instant :

INTITULE	LIEU	SM	3SM	TABL_RESU_1	INST_1	TABL_RESU_2	INST_2	SN	SN*
Li1	ORIG	9.78000E+01	2.93400E+02	TAB1	0.00000E+00	TAB1	0.00000E+00	2.87530E+01	2.87530E+01
Li1	ORIG	9.78000E+01	2.93400E+02	TAB1	0.00000E+00	TAB1	1.00000E+00	3.87825E+00	2.40790E-01
Li1	ORIG	9.78000E+01	2.93400E+02	TAB1	0.00000E+00	TAB1	2.00000E+00	1.27703E+01	8.46220E-01
Li1	ORIG	9.78000E+01	2.93400E+02	TAB1	0.00000E+00	TAB1	3.00000E+00	2.40816E+01	1.68294E+00

...

Dans le cas `TYPE_RESU = 'VALE_MAX'`, seules les valeurs maximales de chacun des paramètres calculés et l'instant de calcul correspondant sont affichés :

INTITULE	LIEU	SM	3SM	TABL_RESU_1	INST_SN_1	TABL_RESU_2	INST_SN_2	SN	INST_SN*_1	INST_SN*_2	SN*
Li1	ORIG	9.780E+01	2.934E+02	TAB1	5.5000E+01	TAB1	9.2500E+02	4.7530E+02	-	-	-
Li1	EXTR	9.780E+01	2.934E+02	TAB1	5.5000E+01	TAB1	9.2500E+02	5.0004E+02	-	-	-
Li1	ORIG	9.780E+01	2.934E+02	TAB1	-	TAB1	-	-	6.5000E+01	6.5000E+01	-
6.48451E+01											
Li1	EXTR	9.780E+01	2.934E+02	TAB1	-	TAB1	-	-	6.5000E+01	6.5000E+01	-
9.60261E+01											

### 2.4.3 Option FATIGUE

Le calcul avec l'option `FATIGUE` se fait de la manière suivante :

```
FAT1=POST_RCCM( MATER=MAT,
                 TYPE_RESU='VALE_MAX',
                 OPTION='FATIGUE',
                 TITRE='FATIGUE_ZH210, RESULTAT: RESU2+RESUTH',
                 TRANSITOIRE=(_F( TABL_RESU_MECA = TAB1,
                                   INST = (0., 1., 2.), NB_OCCUR = 200, ),
                              _F( TABL_RESU_MECA = TABTH,
                                   INST = (0., 1., 2.), NB_OCCUR = 200, ),
                 )
```

La table produite dans le cas `TYPE_RESU = 'DETAILS'` donne, pour chaque combinaison d'instant (d'occurrences `NB_OCCUR_1` et `NB_OCCUR_2`) et pour chaque extrémité : `SN`, `SN*`, `SP`, `KE`, `SALT`, `NADM` et `DOMMAGE` ( $= \min(\text{NB\_OCCUR\_1}, \text{NB\_OCCUR\_2}) / \text{NADM}$ ). La valeur `DOMMAGE_CUMU`, indiquée en fin de tableau pour chaque extrémité du segment, correspond à la combinaison des dommages de tous les sous-cycles.

La table produite dans le cas `TYPE_RESU = 'VALE_MAX'` donne uniquement la valeur maximale de chacun des paramètres listés ci-dessus et les instants correspondants. A noter que le nombre de cycles admissibles affiché est le maximum de ce paramètre sur l'ensemble des combinaisons, et il ne correspond donc pas au `SALT` et au `DOMMAGE` maximum indiqué sur la même ligne. Les valeurs de `SN` et `SN*` indiquées sont les mêmes que celles qui proviendraient d'un calcul avec l'option '`SN`'.

### 3 Étude réglementaire d'une zone particulière d'un composant soumis à de nombreux chargements

Ce chapitre est relatif à l'analyse à la fatigue d'un composant, ou d'une zone particulière d'un composant appartenant à une ligne de tuyauterie, modélisé de façon détaillée en 2D ou en 3D, et soumis aux mêmes situations que les lignes de tuyauteries du premier chapitre. Cela signifie qu'il faudra connaître les contraintes sur un ou plusieurs segments, pour chaque chargement, avec en particulier le séisme, et chaque transitoire thermique.

La gestion de nombreux résultats étant coûteuse, il est d'usage dans ce cas d'effectuer des calculs mécaniques pour des chargements unitaires (un chargement par direction, de norme 1) puis d'effectuer des combinaisons linéaires pour obtenir la réponse à chaque état stabilité de chaque situation. Ce procédé réduit le nombre de calculs mécanique à 7 dans le cas d'un composant à deux extrémités (coude, transition d'épaisseur...) : 6 chargements unitaires et 1 pression unitaire.

#### 3.1 Définition de la zone d'analyse

La zone à analyser doit être choisie telle que les limites du modèles correspondent à des points où les torseurs d'efforts appliqués sont connus. Les parties droites de la zone maillée, assimilables à des maillages 3D de tuyaux, doivent être suffisamment longues, pour que la solution mécanique aux extrémités soit proche d'une solution de type poutre : déplacements et contraintes variant linéairement dans l'épaisseur. Dans ce cas, on pourra appliquer aux extrémités les 6 composantes d'un torseur unité, par l'intermédiaire d'une liaison 3D-poutre (mot-clé `LIAISON_ELEM` de `AFFE_CHAR_MECA`), à un élément de poutre, ou même à un élément discret possédant des degrés de liberté de translation et de rotation.

Il faut bien prendre garde à définir la géométrie 3D dans un repère coïncidant avec le repère local de la zone analysée lors du calcul des efforts de poutre, afin que les torseurs soient définis dans le même repère. Dans le cas contraire, l'utilisateur devra effectuer un changement de repère des torseurs.

Dans le cas d'un coude, dont la flexion génère une ovalisation, on pourra profiter de la liaison 3D-TUYAU, qui permet de raccorder l'extrémité 3D du maillage à des éléments de tuyau, qui possèdent des degrés de liberté d'ovalisation. Ceci permet de diminuer la longueur des parties droites maillées en 3D.

Prenons l'exemple du test RCCM04 [V3.04.136] issu de l'étude [bib1] : il s'agit de l'étude détaillée d'une sous-épaisseur longitudinale dans un coude la ligne VVP étudiée au chapitre 1. Ce coude est maillé à l'aide de ASCOUF.

### 3.2 Calcul préliminaire des efforts aux limites de la zone d'analyse

Les efforts appliqués aux limites du modèle, correspondant à chaque chargement de la liste des situations, devront être calculés au préalable par une analyse de type poutre, comme au chapitre 1. On obtient alors les valeurs des composantes des torseurs appliqués aux limites du modèle 3D, pour chaque état stabilisé de chaque situation. (La liste des situations est celle donnée au chapitre 1). Pour le coude étudié en [bib1], cela donne par exemple :

Cas de charge	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)	P (Bars absolus)
Chargement 1	-0.501	-1.000	0.775	5947	3144	6334	0
Chargement 2	0.962	-11.769	-3.762	-41084	-25691	91767	71.5
Chargement 3	0.662	-10.475	-3.081	-34253	-20695	83346	58.9
Chargement 4	0.534	-10.194	-2.934	-32752	-19577	81995	57.6
Chargement 5	0.897	-11.628	-3.688	-40330	-25129	91090	70
Chargement 6	0.689	-10.533	-3.111	-34565	-20928	83625	59
Chargement 7	1.031	-12.078	-3.925	-42718	-26884	93803	73.4
Chargement 8	0.666	-11.282	-3.509	-38457	-23711	89984	68.1
Chargement 9	0.962	-11.769	-3.762	-41084	-25691	91767	71.5
Chargement 10	1.128	-11.374	-4.088	-43556	-28408	86849	44
Chargement 11	1.031	-12.078	-3.925	-42718	-26884	93803	74.5
Chargement 12	1.181	-11.490	-4.148	-44175	-28869	87403	44
Chargement 13	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
Chargement 14	-19.968	0.182	0.150	1381	5671	-3179	112
Séisme	23.425	-50.966	36.902	240270	-107195	16786	0

Ces valeurs seront directement introduites dans `POST_RCCM` qui effectuera les combinaisons linéaires correspondantes.

### 3.3 Caractéristiques des matériaux

La définition des matériaux est identique à celle du chapitre 1, exceptée la masse volumique, inutile ici. Les caractéristiques thermiques sont similaires. On pourra utiliser le catalogue matériau pour bénéficier des caractéristiques du RCC-M en fonction de la température.

#### Remarque concernant les valeurs à utiliser :

*Le RCC-M B3200 précise que dans le cas de combinaison de chargements mécaniques et thermiques, ce qui est le cas général, il faut prendre  $S_m$  à la température maximum de chaque transitoire. Par contre l'usage en B3600 est de choisir  $S_m$  à la température moyenne des transitoires étudiés.*

Il est indispensable de vérifier la pertinence du système d'unités. Notons par exemple que l'usage de `MACR_ASCOUF_MAIL` implique d'utiliser le mm comme unité de longueur. Donc, toutes les contraintes seront en MPa (N/mm<sup>2</sup>). De même, il faut prendre garde aux unités utilisées dans les caractéristiques thermiques.

### 3.4 Caractéristiques élémentaires des éléments discrets ou linéiques

Les caractéristiques des éléments éventuels de poutre, utilisés pour appliquer les torseurs d'efforts, doivent correspondre à celle de la tuyauterie dans la zone étudiée, et au maillage 3D. Dans la définition de la section, R désigne le rayon externe de la section. On donne ici l'exemple de deux liaisons : du côté encastré, on applique une liaison avec un élément discret. De l'autre côté, on applique des torseurs, la liaison est du type 3D-poutre :

```
MOD=AFFE_MODELE(  MAILLAGE=MA,
  AFPE=(
    _F( GROUP_MA='3D',MODELISATION = '3D',PHENOMENE = 'MECANIQUE'),
    _F( GROUP_MA=('AB',), MODELISATION = 'POU_D_T', PHENOMENE = 'MECANIQUE'),
    _F( GROUP_NO = 'C', MODELISATION = 'DIS_TR', PHENOMENE = 'MECANIQUE'))
  )
CELEM=AFPE_CARA_ELEM(MODELE=MOD,
  POUTRE=_F( GROUP_MA = ('AB',), SECTION = 'CERCLE',
    CARA = ( 'R', 'EP', ),VALE = (0.8128 ,0.032 )),
  DISCRET=_F( GROUP_NO = 'C',
    CARA = 'K_TR_D_N', VALE = (0., 0., 0., 0., 0., 0., )))
```

Il est nécessaire de donner les caractéristiques de raideur à l'élément discret, pour des raisons informatiques.

### 3.5 Conditions aux limites pour le calcul des chargements unitaires

Il faut donc appliquer aux limites du modèle chaque composante du torseur appliqué par la ligne de tuyauterie en ce point. En pratique, on encastre une extrémité (par l'intermédiaire d'une liaison 3D-poutre ou 3D-tuyau, ce qui évite les concentrations de contraintes), et on applique les torseurs sur chacune des autres extrémités (soit 6 composantes dans le cas d'un coude ou d'une partie droite, et 12 composantes dans le cas d'un piquage).

```
CL=AFPE_CHAR_MECA(MODELE=MOD,  LIAISON_ELEM=(
# Liaison 3D-DISCRET
  _F( OPTION = '3D_POU',
    GROUP_MA_1 = 'SU',
    GROUP_NO_2 = 'C'),
# Liaison 3D-POUTRE
  _F( OPTION = '3D_POU',
    GROUP_MA_1 = 'SF',
    GROUP_NO_2 = 'A'))),
# Encastrement de l'élément discret ponctuel
DDL_IMPO=_F( GROUP_NO = 'C',  DX = 0., DY = 0., DZ = 0., DRX = 0.,
  DRY = 0., DRZ = 0.)),
# Une composante du torseur :
FX=AFPE_CHAR_MECA(MODELE=MOD,
  FORCE_NODALE=_F( GROUP_NO = 'B',  FX = 1000.))
MX=AFPE_CHAR_MECA(MODELE=MOD,
  FORCE_NODALE=_F( GROUP_NO = 'B',  MX = 1.))
```

#### Remarque :

La valeur « unitaire » des chargements dépend de l'unité des torseurs qui seront fournis à POST\_RCCM. Ici, les efforts sont en kN et les moments en N.m. Les pressions sont en bars. Dans l'exemple présenté ici, on applique un effort unitaire de 1kN, un moment unitaire de 1N.m et une pression unitaire de 1bar (soit  $10^5$  Pa).

Pour le chargement de pression, il faut appliquer sur les mailles surfaciques internes une pression unité, sans oublier l'effet de fond (qui peut être défini comme suit, ou bien directement à l'aide du mot-clé `EFFE_FOND`) :

```
REXT= 0.8128
EPTUB= 0.032
PINT= 1.E5
RINT= REXT-EPTUB
SINT= PI*(RINT*RINT)
FTOT= PI*(RINT*RINT)
SEXT= PI*(REXT*REXT)
SFON= SEXT-SINT
FREP= FTOT/SFON
PRES1=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=MODMECA,
                      PRES_REP=_F(GROUP_MA='SURFINT',
                                   PRES=PINT),
                      FORCE_FACE=_F(GROUP_MA='EFOND',
                                   FX=FREP, ), );
```

**Remarque :**

*Il est toujours préférable d'orienter les mailles de face où sont appliquées les pressions, car elles ne sont pas toujours orientées convenablement par les mailleurs. Ceci se fait simplement à l'aide de l'opérateur `MODI_MAILLAGE` :*

```
MAIL=MODI_MAILLAGE(reuse =MAIL, MAILLAGE=MAIL,
                   ORIE_PEAU_3D=( _F(GROUP_MA='SURFINT', ),
                                   _F(GROUP_MA='EFOND', ), ),
                   MODELE=MODMECA, );
```

## 3.6 Calculs statiques

On effectuera 7 calculs statiques : un par composante unitaire de torseur, et un pour la pression. Le séisme n'intervient pas à ce niveau, car il se traduit en fait par des torseurs, dont les composantes ont des signes inconnus. C'est `POST_RCCM` qui effectuera toutes les combinaisons de signe.

## 3.7 Relevés des contraintes

Après avoir déterminé un certain nombre de segments sur lesquels seront évalués les critères, il reste à extraire les valeurs des contraintes (`SIEF_ELNO_ELGA` ou `SIGM_ELNO_DEPL`) pour chaque chargement, sur chaque segment. Rappelons que les critères du RCC-M B3200 sont à vérifier pour l'ensemble des segments envisageables, traversant le composant de la peau interne jusqu'à la peau externe. Le choix du segment maximisant les critères est à la charge de l'utilisateur. Pour une géométrie complexe, celui-ci devra donc calculer un certain nombre de segments.

En pratique, dans le *Code\_Aster*, trois méthodes de définition des segments sont possibles :

- la première consiste à utiliser les commandes `INTE_MAIL_2D` ou `INTE_MAIL_3D`, suivant la dimension géométrique du problème, pour définir un segment quelconque passant au travers du maillage :

```
LIGNE1=INTE_MAIL_2D( MAILLAGE=MA,
                     DEFI_SEGMENT=_F( ORIGINE   = ( -1.0,  0.5, ),
                                       EXTREMITE = (  1.0,  0.5, )),
                     INFO=2 )
```



- la seconde consiste à utiliser un groupe de nœuds préexistant dans le maillage, définissant un segment. Cette méthode nécessite obligatoirement de réordonner au préalable le groupe de nœuds, pour que les nœuds le composant soient rangés de la peau interne vers la peau externe :

```
MA=DEFI_GROUP(reuse=MA,   MAILLAGE=MA,
              CREA_GROUP_NO=(_F( OPTION = 'SEGM_DROI_ORDO',
                                NOM    = 'LIGNE',
                                GROUP_NO='GN1',
                                NOEUD_ORIG = 'N22',
                                NOEUD_EXTR = 'N12',
                                PRECISION = 1.E-03,
                                CRITERE   = 'RELATIF' )
```

- la troisième consiste à utiliser MACR\_LIGN\_COUPE, qui effectue une projection des champs de contraintes moyennés aux nœuds sur un maillage 1D dont on fournit les extrémités et le nombre d'éléments :

```
MACR_LIGN_COUPE(  RESULTAT    = RESUT, NOM_CHAM='SIGM_NOEU_DEPL',
                  MODELE      = MODMECA,
                  LIGN_COUPE  = ( _F( NB_POINTS = 10,
                                      COOR_ORIG = (0,3,0.18),
                                      COOR_EXTR = (0,3,0.2),
                                      TABLE    = CO("TAB2") ), , ) )
```

Pour alléger les calculs, les tables résultats de ces extractions pourront être écrites sur un fichier à l'aide de IMPR\_TABLE, au format ASTER. Ainsi le post-traitement n'aura plus qu'à relire ces tables (à l'aide de LIRE\_TABLE [U7.02.03]) sans avoir à gérer des résultats de grandes tailles.

Les tables ont la forme suivante :

```
#DEBUT_TABLE
#TITRE ASTER 6.4 CONCEPT TRCA_1 CALCULE LE 03/11/2002 A 09:06:13 SOUS_EP LONGI
#TITRE TABL_POST_RELEVÉ NUMERO 1 EFFORT FX
NOEUD   NOM_CHAM   ABSC_CURV   SIXX       SIYY       SIZZ       SIXY       SIXZ       SIYZ
K8      K16        R            R            R            R            R            R            R
N1678   SIEF_ELNO_ELGA 0.00000E+00 -1.27858E-03 -3.15954E-03 -4.34084E-02 -3.34792E-13 -7.38056E-03 -
1.79181E-12
N1680   SIEF_ELNO_ELGA 5.33333E+00 -1.12894E-03 -6.39054E-03 -4.14610E-02  3.92425E-14 -6.51754E-03 -
1.41419E-12
N1682   SIEF_ELNO_ELGA 1.06667E+01 -9.36233E-04 -9.61344E-03 -3.95320E-02  4.40551E-13 -5.65075E-03 -
1.03617E-12
N1684   SIEF_ELNO_ELGA 1.60000E+01 -8.84555E-04 -1.30290E-02 -3.74732E-02  5.69397E-13 -5.52805E-03 -
6.68335E-13
N1686   SIEF_ELNO_ELGA 2.13333E+01 -7.91024E-04 -1.64407E-02 -3.54349E-02  7.02376E-13 -5.30574E-03 -
3.05450E-13
N1688   SIEF_ELNO_ELGA 2.66667E+01 -1.23405E-03 -2.07044E-02 -3.16426E-02  5.06784E-13 -6.18022E-03 -
4.51977E-13
N1690   SIEF_ELNO_ELGA 3.20000E+01 -1.76201E-03 -2.49802E-02 -2.78113E-02  2.79785E-13 -7.15807E-03 -
1.21395E-12
#FIN_TABLE
```

### 3.8 Calculs thermomécaniques

Les **calculs thermiques** doivent être effectués pour chaque transitoire thermique à prendre en compte. Il faut prendre garde à mailler finement, par exemple à l'aide l'éléments linéaires à masse diagonalisée (modélisation 3D\_DIAG), ce qui permet d'éviter les dépassements de maximum. Les pas de temps doivent être optimisés, pour capter les gradients de température dans l'épaisseur dus aux transitoires thermiques violents.

Si on veut modéliser des transitoires de grande amplitude, il est plus précis d'effectuer des calculs thermiques non linéaires (THER\_NON\_LINE) en considérant les caractéristiques thermiques variables avec la température.

Généralement, les chargements thermiques sont constitués d'histoires de températures fluide en peau interne, avec des coefficients d'échange constants, ou fonction du temps. On utilise souvent les expressions suivantes pour estimer les coefficients d'échange en fonction du débit du fluide (formule de Colburn) :

$$H = 0.023 \frac{\lambda_f}{D_f} \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4} \text{ avec } \text{Re} = \frac{4Q}{\pi D_f^2 \nu} \text{ où } Q \text{ est le débit du fluide, } D_f \text{ le diamètre interne de}$$

la tuyauterie,  $\lambda_f$  la conductivité thermique de l'eau,  $\nu$  la viscosité cinématique et  $\text{Pr}$  le nombre de Prandtl. Toutes ces caractéristiques varient en fait en fonction de la température. On peut choisir la température moyenne de chaque transitoire pour évaluer ces quantités.

Cela peut être introduit directement dans le fichier de commandes sous la forme :

```
PRANDTL= 1.35
LF= 0.45
NF= 0.123E-6
DF= 0.1319
DEBIT=20/3600
RE1= 4*DEBIT/NF/PI/DF/DF
COEFH= 0.0023*(PRANDTL**(0.4))*(RE1**(0.8))*LF/DF
```

Les autres faces (face externe et extrémités) sont souvent isolées, ce qui se traduit par une condition de flux nul (pas de condition particulière à introduire pour le calcul thermique). Le coefficient de Prandtl est adimensionnel, la conductivité thermique est en W/m.°C, le débit en m³/s et la viscosité cinématique en m²/s.

Les résultats thermiques issus des calculs précédents sont introduits comme chargements pour les **calculs thermomécaniques**. On utilisera de préférence des mailles d'ordre 2. Les champs de température P1 seront donc projetés sur ce maillage P2, à l'aide de PROJ\_CHAMP.

```
TEMP2 = PROJ_CHAMP(
    METHODE= 'ELEM',
    RESULTAT=TEMP,
    MODELE_1=MODTHER,
    MODELE_2=MODMECA,
    TOUT_ORDRE= 'OUI' )
```

Avec MODTHER le modèle thermique (3D\_DIAG, éléments d'ordre 1) et MODMECA le modèle mécanique (3D, éléments d'ordre 2). On peut arriver à la même qualité de résultats (sans utiliser 3D\_DIAG) avec un maillage unique, d'ordre 2, suffisamment fin pour pouvoir utiliser des pas de temps fins.

Les conditions aux limites associées doivent permettre d'éviter les mouvements de corps solide (encastrement de l'une des extrémités via l'élément discret par exemple).

Une fois le calcul thermomécanique effectué, on **extraie les contraintes** par l'une des trois méthodes déjà citées. On obtiendra alors, pour chaque segment, et chaque transitoire, une table contenant les 6 composantes de contraintes, pour chaque instant (la liste d'instant peut être réduite au moment de l'extraction).

### 3.9 POST\_RCCM sur chaque segment

Sur chaque segment, il faut appeler POST\_RCCM, option PM\_PB, SN ou FATIGUE. L'analyse la plus complète correspond à l'option FATIGUE.

Le matériau est suppose unique le long du segment. On doit donc fournir à POST\_RCCM le matériau (défini par DEFI\_MATERIAU ou INCLUDE\_MATERIAU) contenant les caractéristiques mécaniques à la température maximum des transitoires.

Plus précisément [R7.04.03], le calcul de l'amplitude de contraintes  $S'_{alt}(i, j)$  est effectué, pour chaque couple d'états stabilisés (i,j), et chaque extrémité du segment, à partir du tenseur des contraintes  $S_p(i, j)$  et du tenseur des contraintes linéarisées  $S_n(p, q)$ , en prenant en compte le rapport des modules d'Young à la température maximum du transitoire et à la température de référence de la courbe de Wöhler :

$$S'_{alt}(i, j) = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_c}{E} \cdot K_e(S_n(p, q)) \cdot S_p(i, j)$$

avec :

$E_c$  : Module d'Young de référence pour la construction de la courbe de Wöhler, fourni par l'utilisateur dans `DEFI_MATERIAU`, sous le mot clé `E_REFE`, du mot clé facteur `FATIGUE`.

$K_e$  le facteur de concentration élasto-plastique défini au §B3234.6 du RCC-M.  $K_e$  peut être calculé de deux façons :

- `KE_MECA` : c'est la méthode originelle, seule disponible dans les versions antérieures à la version 7.2 [cf. R7.04.03] :

$$K_e(S_n(p, q)) = \begin{cases} 1 & \text{si } S_n(p, q) \leq 3.S_m \\ 1 + \frac{1-n}{n.(m-1)} \cdot \left( \frac{S_n(p, q)}{3.S_m} - 1 \right) & \text{si } 3.S_m < S_n(p, q) < 3.m.S_m \\ \frac{1}{n} & \text{si } S_n(p, q) \geq 3.m.S_m \end{cases}$$

avec  $m$  et  $n$  dépendant du matériau, et fournis par l'utilisateur dans `DEFI_MATERIAU`, sous les mots clés `M_KE_RCCM` et `N_KE_RCCM`, du mot clé facteur `FATIGUE`.

- `KE_MIXTE` : depuis le modificatif 1997 du RCC-M, on peut choisir une autre formule, basée sur une décomposition de  $S_{alt}$  :

$$S'_{alt}(i, j) = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_c}{E} \cdot (K_e^{meca}(S_n(p, q)) \cdot S_p^{meca}(i, j) + K_e^{ther}(S_n(p, q)) \cdot S_p^{ther}(i, j)) \text{ avec :}$$

$K_e^{meca}(S_n(p, q))$  est égal au  $K_e$  défini dans [R7.04.03], et

$$K_e^{ther}(S_n(p, q)) = \max \begin{cases} 1 \\ 1.86 \cdot \left( 1 - \frac{1}{1.66 + \frac{S_n}{S_m}} \right) \end{cases}$$

$S_p^{meca}(i, j)$  représente la quantité  $S_p$ , amplitude de variation de la part mécanique des contraintes, entre les instants  $i$  et  $j$ , ou valeur maxi de cette quantité au cours du transitoire, calculée sur la base des sollicitations d'origine mécanique : pression, poids propre, séisme (inertiel et déplacements d'ancrage), expansion thermique.

$S_p^{ther}(i, j)$  représente la quantité  $S_p$  calculée à partir des contraintes mécaniques engendrées uniquement par les transitoires thermiques.

Titre : Notice d'utilisation du calcul et du post-traitement RCCM

Date : 22/02/06

Auteur(s) : E. GALENNE, J.M. PROIX, M. ABBAS

Clé : U2.09.03-B1 Page : 28/30

Dans l'exemple étudié, les commandes sont les suivantes (pour un segment) :

On extrait les tables contenant les extractions de contraintes sur le segment, pour chacun des 7 chargements unitaires, et pour chacun des transitoires thermiques :

```
TLIG1_FX = LIRE_TABLE (UNITE=38, TITRE='TLIG1_FX',NUME_TABLE=1)
...
TLIG1_PR = LIRE_TABLE (UNITE=38, TITRE='TLIG1_PR',NUME_TABLE=55,)

# RESULTATS THERMOMECHANIQUES

TLIG1_T2 = LIRE_TABLE (UNITE=38, TITRE='TLIG1_T2',NUME_TABLE=64,)
TLIG1_T6 = LIRE_TABLE (UNITE=38, TITRE='TLIG1_T6',NUME_TABLE=73,)

# LE MATERIAU EST SUPPOSE UNIQUE LE LONG DU SEGMENT

TBRCCM1=POST_RCCM(TYPE_RESU='VALE_MAX',
                  TYPE_RESU_MECA='UNITAIRE',
                  OPTION='FATIGUE',
                  MATER=MAT_A48,
                  TYPE_KE = 'KE_MECA',
                  INFO=2,

# les situations sont définies comme pour FATIGUE_B3600
SITUATION=(
    _F(NB_OCCUR=190,
        NUME_SITU=1,
        NOM_SITU='Passage arret a froid - fonctionnement nominal',
        NUME_GROUPE=1,
        PRES_A=1.0E5,
        PRES_B=71.5E5,
        TEMP_REF_A=10.0,
        TEMP_REF_B=287.0,
        CHAR_ETAT_A=1,
        CHAR_ETAT_B=2,),
    _F(NB_OCCUR=1300000,
        NUME_SITU=2,
        NOM_SITU='fluctuations en regime permanent',
        NUME_GROUPE=1,
        PRES_A=58.9E5,
        PRES_B=57.6E5,
        TEMP_REF_A=274.5,
        TEMP_REF_B=272.5,
        CHAR_ETAT_A=3,
        CHAR_ETAT_B=4,
        NUME_RESU_THER=2,),
    ...

    _F(NB_OCCUR=10,
        NB_CYCL_SEISME=390,
        NUME_SITU=7,
        NOM_SITU='Seisme SNA',
        COMBINABLE='OUI',
        NUME_GROUPE=1,
        PRES_A=0.0,
        PRES_B=0.0,
        TEMP_REF_A=20.0,
        TEMP_REF_B=20.0,
        CHAR_ETAT_A=(1000,1001),
        CHAR_ETAT_B=(1000,1001)),
),

# torseurs mécaniques : un pour chaque état stabilisé (donc 2 par situation) :

CHAR_MECA=(
    _F(NUME_CHAR=1, NOM_CHAR='ETAT 1 SITUATION 1',
        FX=-0.501, FY=-1.000, FZ=0.775, MX=5947., MY=3144., MZ=6334., ),
    _F(NUME_CHAR=2, NOM_CHAR='ETAT 2 SITUATION 1',
        FX=0.962, FY=-11.769, FZ=-3.762, MX=-41084., MY=-25691., MZ=91767., ),
    _F(NUME_CHAR=3, NOM_CHAR='ETAT 3 SITUATION 2',
        FX=0.662, FY=-10.475, FZ=-3.081, MX=-34253., MY=-20695., MZ=83346., ),
    ...

    _F(NUME_CHAR=1000, NOM_CHAR='SNA', TYPE_CHAR='SEISME',
        FX=23.425, FY=-50.966, FZ=36.902, MX=240270., MY=-107195., MZ=16786.),
),

# résultats thermomécaniques
RESU_THER=(
    _F(NUME_RESU_THER=2,
        TABL_RESU_THER=TLIG1_T2, ),
    _F(NUME_RESU_THER=6,
```

Titre : Notice d'utilisation du calcul et du post-traitement RCCM  
 Auteur(s) : E. GALENNE, J.M. PROIX, M. ABBAS

Date : 22/02/06  
 Clé : U2.09.03-B1 Page : 29/30

```
TABL_RESU_THER=TLIG1_T6, ),
),
# les profils de contraintes issus des calculs mécaniques unitaires
RESU_MECA_UNIT=(
  _F(TABL_FX=TLIG1_FX,
    TABL_FY=TLIG1_FY,
    TABL_FZ=TLIG1_FZ,
    TABL_MX=TLIG1_MX,
    TABL_MY=TLIG1_MY,
    TABL_MZ=TLIG1_MZ,
    TABL_PRES=TLIG1_PR, ),
  ), );
IMPR_TABLE(TABLE=TBRCM1, );
```

### 3.10 Description des tables produites

La table produite pour l'option PM\_PB contient les valeurs de PM, PB et PM-PB aux extrémités du segment pour chaque situation de chargement. La valeur indiquée correspond au maximum du paramètre considéré, calculé aux états mécaniques A et B définis par l'utilisateur. Si le groupe de situations comprend un chargement de type SEISME, la valeur indiquée pour une situation (hors séisme) de ce groupe correspond au maximum obtenu en prenant en compte les chargements non signés du séisme. La valeur sans séisme de cette situation peut être retrouvée dans le fichier message si INFO=2.

La table produite pour l'option SN contient les valeurs SN et SN\* aux extrémités du segment pour chaque situation de chargement. Si le groupe de situations comprend un chargement de type SEISME, la valeur indiquée pour une situation (hors séisme) de ce groupe correspond au maximum obtenu en prenant en compte les chargements non signés du séisme. La valeur sans séisme de cette situation peut être retrouvée dans le fichier message si INFO=2.

La table produite pour l'option FATIGUE reprend les mêmes informations que pour les options précédentes (PM, PB, PM-PB, SN et SN\*) pour chaque situation, et la valeur du facteur d'usage FACT\_USAGE et sa contribution %\_FACT\_USAGE pour chaque combinaison de situation possible. Enfin, pour les deux extrémités du segment, on trouve SN\_MAX, SP\_MAX, SALT\_MAX et FACT\_USAGE\_CUMU :

```
ASTER 6.03.18 CONCEPT TBRCM1 CALCULE LE 01/10/2002 A 10:51:56 DE TYPE
TABL_POST_RCCM
LIEU SM SN/3SM SN_MAX SP_MAX SALT_MAX FACT_USAGE_CUMU
ORIG 1.33600E+08 3.48221E-02 1.39567E+07 1.43295E+07 7.27012E+06 1.39288E-05
EXTR 1.33600E+08 5.23888E-02 2.09974E+07 2.19719E+07 1.11475E+07 3.76647E-05
```

Il est possible d'obtenir le détail des calculs avec INFO=2 : les valeurs de SN et de SP sont alors indiquées dans le fichier message pour chaque combinaison de chargement de chaque groupe. Les matrices SALT sont également indiquées à chaque itération du calcul du dommage cumulé.

## 4 Bibliographie

---

- [1] F.CURTIT : "Analyse à la fatigue d'une ligne VVP intérieur BR avec sous-épaisseur". Note EDF / MMC HT-26/00/057/B
  
- [2] "RCC-M : Règles de Conception et de Construction des matériels mécaniques des îlots nucléaires PWR. Edition 1991". Edité par l'AFCEN : Association française pour les règles de conception et de construction des matériels des chaudières électro-nucléaires.