

---

## Notice d'utilisation du modèle THM

---

### Résumé :

Les modélisations THM traitent exclusivement de l'évolution des comportements Thermo-Hydro-Mécaniques des milieux poreux saturés, ou non, par un ou deux fluides. La description numérique et physique des ces modélisations dans Code\_Aster est détaillée dans [R7.01.10] et [R7.01.11].

On détaille dans cette documentation la procédure à suivre pour réaliser des simulations dans le contexte des modélisations THM. On décrit dans la première partie les différentes étapes de calculs dans le cadre général des milieux continus dits « généralisés » (cf [R7.01.10]). Dans cette partie, on ne détaillera pas ce qui concerne les modèles mécaniques décrits ailleurs. On restreint dans la seconde partie l'application de ces modélisations pour traiter les milieux poreux qui subissent une dégradation de leur propriétés mécaniques par endommagement du sol ou des roches par exemple. Pour cela, on étend les modélisations THM aux milieux à microstructure en prenant en compte les effets second gradient (cf [R5.04.03]). L'objectif est de corriger la dépendance à la discrétisation spatiale des solutions lorsque la loi de comportement mécanique considérée est de type adoucissante – ce qui est le cas pour tout matériau fragile, et donc les sols en particulier.

## Table des Matières

1 Les grandes lignes.....	3
1.1 Contexte des études THM.....	3
1.2 Généralités.....	3
1.3 Étapes de calculs.....	4
2 Les différentes étapes d'un calcul THM.....	4
2.1 Choix du modèle.....	4
2.2 Définition du matériau.....	8
2.2.1 Mot clé simple COMP_THM.....	9
2.2.2 Mot clé facteur THM_INIT.....	11
2.2.3 Mot clé facteur THM_LIQU.....	13
2.2.4 Mot clé facteur THM_GAZ.....	14
2.2.5 Mot clé facteur THM_VAPE_GAZ.....	14
2.2.6 Mot clé facteur THM_AIR DISS.....	15
2.2.7 Mot clé facteur THM_DIFFU.....	15
2.2.8 Récapitulatif des fonctions de couplages et leur dépendance.....	20
Mot clé facteur THM_DIFFU.....	21
2.3 Initialisation du calcul.....	24
2.4 Chargements et conditions aux limites.....	26
2.5 Le calcul non linéaire.....	28
2.5.1 Résolution par couplage.....	29
2.5.2 Résolution par chaînage.....	29
2.5.3 Conseils généraux d'utilisation.....	31
2.6 Le post-traitement.....	36
2.6.1 Généralités.....	36
2.6.2 Variables internes.....	37
2.6.3 Isovaleurs.....	38
2.7 Quelques cas tests.....	40
3 Les modélisations THM par une approche second gradient.....	41
3.1 Définition du patch.....	41
3.1.1 Étape 1. Définition du maillage de la structure.....	41
3.1.2 Étape 2. Duplication du maillage pour définir le patch.....	41
3.1.3 Étape 3. Modification (éventuelle) du maillage du patch.....	42
3.2 Choix du modèle.....	42
3.3 Définition du matériau.....	43
3.4 Impact sur les conditions aux limites.....	43
3.5 Résolution du problème.....	44
Annexe 1 Contraintes généralisées et variables internes.....	45
Annexe 2 Éléments supplémentaires sur les conditions aux limites en THM.....	47

## 1 Les grandes lignes

### 1.1 Contexte des études THM

Avant toute chose, il convient de définir le cadre bien précis des calculs Thermo-Hydro-Mécaniques. Ceux-ci ont pour application exclusive l'étude des milieux poreux. Sachant cela, la modélisation THM couvre l'évolution mécanique de ces milieux et les écoulements en leur sein. Ces derniers concernent un ou deux fluides et sont régis par les lois de Darcy (fluides darcéens). Le problème de THM complet traite donc de l'écoulement des ou du fluide(s), de la mécanique du squelette, ainsi que de la thermique: la résolution est très souvent entièrement couplée. Elle peut également être chaînée dans les cas où les phénomènes hydraulique et mécanique sont faiblement couplés.

### 1.2 Généralités

Les calculs s'appuient sur des familles de lois de comportement THM pour les milieux poreux saturés et non saturés. La mécanique des milieux poreux rassemble une collection très exhaustive de phénomènes physiques touchant aux solides et aux fluides. Elle fait l'hypothèse d'un couplage entre les évolutions mécaniques des solides et des fluides, vus comme des milieux continus, avec les évolutions hydrauliques, qui règlent les problèmes de diffusion de fluides au sein de parois ou de volumes, et les évolutions thermiques. La formulation de la modélisation Thermo-hydro-mécanique (THM) en milieu poreux telle qu'elle est faite dans *Code\_Aster* est détaillée dans [R7.01.11] et [R7.01.10]. Toutes les notations employées ici s'y réfèrent donc. On rappelle cependant quelques notations indispensables par la suite :

Concernant les fluides, on considère (cas le plus complet) deux phases (liquide et gaz) et deux constituants appelés par commodité eau et air. On utilise alors les indices suivants :

- $w$  pour l'eau liquide
- $ad$  pour l'air dissous
- $as$  pour l'air sec
- $vp$  pour la vapeur d'eau

Les variables thermodynamiques sont :

- les pressions des constituants :  $p_w(x, t)$ ,  $p_{ad}(x, t)$ ,  $p_{vp}(x, t)$ ,  $p_{as}(x, t)$ ,
- la température du milieu  $T(x, t)$ .

Ces différentes variables ne sont pas totalement indépendantes. En effet, si l'on considère un seul constituant, l'équilibre thermodynamique entre ses phases impose une relation entre la pression de la vapeur et la pression du liquide de ce constituant. Finalement, il n'y a qu'une seule pression indépendante par constituant, de même qu'il n'y a qu'une seule équation de conservation de la masse. Le nombre de pressions indépendantes est donc égal au nombre de constituants indépendants. Le choix de ces pressions varie selon les lois de comportements.

Pour le cas dit saturé (un seul constituant air ou eau), nous avons choisi la pression de cet unique constituant.

Pour le cas dit non saturé (présence d'air et d'eau), nous avons choisi comme variables indépendantes :

- la pression totale du gaz  $p_{gz}(x, t) = p_{vp} + p_{as}$ ,
- la pression capillaire  $p_c(x, t) = p_{gz} - p_{lq} = p_{gz} - p_w - p_{ad}$ .

Nous verrons par la suite la terminologie Aster pour ces variables.

## 1.3 Étapes de calculs

Pour les étapes nécessaires à la mise en œuvre d'un calcul Aster, indépendamment des aspects purement THM, on se référera à la documentation de chaque commande utilisée.

Dans tout calcul Aster, plusieurs étapes clés doivent être effectuées :

- Choix de la modélisation
- Données matériaux
- Initialisation
- Calcul
- Post-traitement

Ces points sont détaillés dans le chapitre suivant.

## 2 Les différentes étapes d'un calcul THM

### 2.1 Choix du modèle

Le traitement numérique en THM nécessite un maillage quadratique puisque les éléments sont de type *P2* en déplacement et *P1* en pression et température afin d'éviter des problèmes d'oscillations.

Le choix se fait par l'utilisation de la commande `AFPE_MODELE` comme dans l'exemple ci-dessous :

```
MODELE=AFPE_MODELE (MAILLAGE=MAIL,  
                    AFPE=_F (TOUT='OUI',  
                             PHENOMENE='MECANIQUE',  
                             MODELISATION='AXIS_THH2MD',),),)
```

Dans tous les cas, le phénomène est 'MECANIQUE' (même si la modélisation ne contient pas la mécanique).

L'utilisateur doit renseigner ensuite de manière obligatoire le mot clé `MODELISATION`. Ce mot clé permet de définir le type d'élément affecté à un type de maille. Les modélisations disponibles en THM sont indiqués dans le tableau 2.1-1.

#### **Remarque concernant le traitement numérique (mot clé se terminant par D ou S) :**

Les modélisations se terminant par la lettre D indiquent que l'on fait un traitement permettant de diagonaliser (« lumped ») la matrice afin d'éviter les oscillations pour les problèmes hydrauliques. Pour cela les points d'intégration sont pris aux sommets des éléments. Ce traitement étant peu adapté à la mécanique, on dispose également d'une modélisation dite « sélective ». Dans ce cas, les termes capacitifs sont intégrés aux sommets alors que les termes diffusifs sont intégrés aux points de Gauss. Ces modélisations se terminent par un S. Les autres modélisations intègrent tout aux point de Gauss.

On conseille vivement à l'utilisateur d'utiliser les modélisations D ou S dans les cas sans mécanique et d'utiliser la modélisation S et pour les modélisations avec mécanique.

Les modélisations « classiques » (sans D ni S) sont amenés à être résorbées et sont déconseillées.

MODELISATION	Modélisation géométrique	Phénomènes pris en compte
D_PLAN_HM	plane	Mécanique, hydraulique avec une pression inconnue
D_PLAN_HMD	plane	Mécanique, hydraulique avec une pression inconnue (lumpé)
D_PLAN_HMS	plane	Mécanique, hydraulique avec une pression inconnue (sélective)
D_PLAN_HM_SI	plane	Mécanique, hydraulique avec une pression inconnue (sous-intégrée)
D_PLAN_HHM	plane	Mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues
D_PLAN_HHMD	plane	Mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues (lumpé)
D_PLAN_HHMS	plane	Mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues (sélective)
D_PLAN_HH2MD	plane	Mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues et deux constituants par phase (lumpé)
D_PLAN_HH2MS	plane	Mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues et deux constituants par phase (sélective)
D_PLAN_THHD	plane	Thermique, hydraulique avec deux pressions inconnues (lumpé)
D_PLAN_THH2D	plane	Thermique, hydraulique avec deux pressions inconnues et deux constituants par phase (lumpé)
D_PLAN_THH2S	plane	Thermique, hydraulique avec deux pressions inconnues et deux constituants par phase (sélective)
D_PLAN_THM	plane	Thermique, mécanique, hydraulique avec une pression inconnue
D_PLAN_THVD	plane	Thermique, mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues (2 phases : eau liquide et vapeur) (lumpé)
D_PLAN_THMD	plane	Thermique, mécanique, hydraulique avec une pression inconnue (lumpé)
D_PLAN_THMS	plane	Thermique, mécanique, hydraulique avec une pression inconnue (sélective)
D_PLAN_THHMD	plane	Thermique, mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues (lumpé)
D_PLAN_THHMS	plane	Thermique, mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues (sélective)
D_PLAN_HHD	plane	hydraulique avec deux pressions inconnues (lumpé)
D_PLAN_HHS	plane	hydraulique avec deux pressions inconnues (sélective)
D_PLAN_HH2D	plane	hydraulique avec deux pressions inconnues et deux constituants par phase (lumpé)
D_PLAN_HH2S	plane	hydraulique avec deux pressions inconnues et deux constituants par phase (sélective)
D_PLAN_THH2MD	plan	Thermique, mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues et deux constituants par phase (lumpé)
D_PLAN_THH2MS	plane	Thermique, mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues et deux constituants par phase (sélective)
AXIS_HM	axisymétrique	Mécanique, hydraulique avec une pression inconnue
AXIS_HMD	axisymétrique	Mécanique, hydraulique avec une pression inconnue (lumpé)
AXIS_HMS	axisymétrique	Mécanique, hydraulique avec une pression inconnue (sélective)
AXIS_HHM	axisymétrique	Mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues
AXIS_HHMD	axisymétrique	Mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues (lumpé)
AXIS_HHMS	axisymétrique	Mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues (sélective)
AXIS_HH2MD	axisymétrique	Mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues et deux constituants par phase (lumpé)
AXIS_HH2MS	axisymétrique	Mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues et deux constituants par phase (sélective)
AXIS_THHD	axisymétrique	Thermique, hydraulique avec deux pressions inconnues (lumpé)
AXIS_THHS	axisymétrique	Thermique, hydraulique avec deux pressions inconnues (sélective)

MODELISATION	Modélisation géométrique	Phénomènes pris en compte
AXIS_THH2D	axisymétrique	Thermique, hydraulique avec deux pressions inconnues et deux constituants par phase (lumpé)
AXIS_THH2S	axisymétrique	Thermique, hydraulique avec deux pressions inconnues et deux constituants par phase (sélective)
AXIS_THM	axisymétrique	Thermique, mécanique, hydraulique avec une pression inconnue
AXIS_THMD	axisymétrique	Thermique, mécanique, hydraulique avec une pression inconnue (lumpé)
AXIS_THMS	axisymétrique	Thermique, mécanique, hydraulique avec une pression inconnue (sélective)
AXIS_THVD	axisymétrique	Thermique, mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues (2 phases : eau liquide et vapeur) (lumpé)
AXIS_THHMD	axisymétrique	Thermique, mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues (lumpé)
AXIS_THHMS	axisymétrique	Thermique, mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues (sélective)
AXIS_THH2MD	axisymétrique	Thermique, mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues et deux constituants par phase (lumpé)
AXIS_THH2MS	axisymétrique	Thermique, mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues et deux constituants par phase (sélective)
AXIS_HHD	axisymétrique	hydraulique avec deux pressions inconnues (lumpé)
AXIS_HHS	axisymétrique	hydraulique avec deux pressions inconnues (sélective)
AXIS_HH2D	axisymétrique	hydraulique avec deux pressions inconnues et deux constituants par phase (lumpé)
AXIS_HH2S	axisymétrique	hydraulique avec deux pressions inconnues et deux constituants par phase (sélective)
3D_HM	3D	Mécanique, hydraulique avec une pression inconnue
3D_HMD	3D	Mécanique, hydraulique avec une pression inconnue (lumpé)
3D_HMS	3D	Mécanique, hydraulique avec une pression inconnue (sélective)
3D_HM_SI	3D	Mécanique, hydraulique avec une pression inconnue (sous-intégrée)
3D_HHM	3D	Mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues
3D_HHMD	3D	Mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues (lumpé)
3D_HHMS	3D	Mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues (sélective)
3D_HH2MD	3D	Mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues et deux constituants par phase (lumpé)
3D_HH2MS	3D	Mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues et deux constituants par phase (sélective)
3D_THHD	3D	Thermique, hydraulique avec deux pressions inconnues (lumpé)
3D_THH2D	3D	Thermique, hydraulique avec deux pressions inconnues et deux constituants par phase (lumpé)
3D_THH2S	3D	Thermique, hydraulique avec deux pressions inconnues et deux constituants par phase (sélective)
3D_THM	3D	Thermique, mécanique, hydraulique avec une pression inconnue
3D_THMD	3D	Thermique, mécanique, hydraulique avec une pression inconnue (lumpé)
3D_THMS	3D	Thermique, mécanique, hydraulique avec une pression inconnue (sélective)
3D_THVD	3D	Thermique, mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues (2 phases : eau liquide et vapeur) (lumpé)
3D_THHM	3D	Thermique, mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues
3D_THHMD	3D	Thermique, mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues (lumpé)

MODELISATION	Modélisation géométrique	Phénomènes pris en compte
3D_THHMS	3D	Thermique, mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues (sélective)
3D_THH2MD	3D	Thermique, mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues et deux constituants par phase (lumpé)
3D_THH2MS	3D	Thermique, mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues et deux constituants par phase (sélective)
3D_HHD	3D	hydraulique avec deux pressions inconnues (lumpé)
3D_HHS	3D	hydraulique avec deux pressions inconnues (sélective)
3D_HH2D	3D	hydraulique avec deux pressions inconnues et deux constituants par phase (lumpé)
3D_HH2S	3D	hydraulique avec deux pressions inconnues et deux constituants par phase (sélective)

Tableau 2.1-1: Modélisations THM

Les inconnues principales qui sont aussi les valeurs des degrés de liberté, sont notées dans le cas de la modélisation la plus complète (3D thermique, mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues).

$$\{u\}^{ddl} = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \\ PRE1^{ddl} \\ PRE2^{ddl} \\ T^{ddl} \end{pmatrix}$$

Le contenu de *PRE1* et *PRE2* dépend du couplage choisi et sera explicité dans la section 11. Suivant la modélisation choisie, seuls certains de ces degrés de liberté existent. Le tableau ci-dessus résume les degrés de liberté utilisés pour chaque modélisation.

MODELISATION	$u_x$	$u_y$	$u_z$	$PRE1^{ddl}$	$PRE2^{ddl}$	$T^{ddl}$
D PLAN HM( , S, D, SI)	X	X		X		
D PLAN HHM( , S, D)	X	X		X	X	
D PLAN HH2M(S, D)	X	X		X	X	
D PLAN THH(S, D)				X	X	X
D PLAN THH2(S, D)				X	X	X
D PLAN THM( , S, D)	X	X		X		X
D PLAN THV( , S, D)				X	X	X
D PLAN THHM(S, D)	X	X		X	X	X
D PLAN THH2M(S, D)	X	X		X	X	X
D PLAN HH(S, D)				X	X	
D PLAN HH2(S, D)				X	X	
AXIS HM( , S, D)	X	X		X		
AXIS HHM( , S, D)	X	X		X	X	
AXIS HH2M(S, D)	X	X		X	X	
AXIS THH(S, D)				X	X	X
AXIS THH2(S, D)				X	X	X
AXIS THM( , S, D)	X	X		X		X
AXIS THV( , S, D)				X	X	X
AXIS THHM(S, D)	X	X		X	X	X
AXIS THH2M(S, D)	X	X		X	X	X
AXIS HH(S, D)				X	X	

MODELISATION	$u_x$	$u_y$	$u_z$	$PRE1^{ddl}$	$PRE2^{ddl}$	$T^{ddl}$
AXIS_HH2(S,D)				X	X	
3D_HM(,S,D,SI)	X	X	X	X		
3D_HHM(,S,D)	X	X	X	X	X	
3D_HH2M(S,D)	X	X	X	X	X	
3D_THH(S,D)				X	X	X
3D_THH2D				X	X	X
3D_THM(,S,D)	X	X	X	X		X
3D_THVD(,S,D)				X	X	X
3D_THHM(,S,D)	X	X	X	X	X	X
3D_THH2M(S,D)	X	X	X	X	X	X
3D_HH(S,D)				X	X	
3D_HH2(S,D)				X	X	

Les contraintes généralisées et les variables internes sont toutes indiquées en [§Annexe 1]. Les notations utilisées sont celles définies dans [R7.01.11].

## 2.2 Définition du matériau

Le matériau est défini par la commande `DEFI_MATERIAU` comme dans l'exemple ci-dessous :

```
MATERBO=DEFI_MATERIAU(ELAS=_F(E=5.15000000E8,
    NU=0.20,
    RHO=2670.0,
    ALPHA=0.),
    COMP_THM = 'LIQU_AD_GAZ_VAPE',
    THM_LIQU=_F(RHO=1000.0,
    UN_SUR_K=0.,
    ALPHA=0.,
    CP=0.0,
    VISC=VISCOLIQ,
    D_VISC_TEMP=DVISCOL),
    THM_GAZ=_F(MASS_MOL=0.01,
    CP=0.0,
    VISC=VISCOGAZ,
    D_VISC_TEMP=ZERO),
    THM_VAPE_GAZ=_F(MASS_MOL=0.01,
    CP=0.0,
    VISC=VISCOGAZ,
    D_VISC_TEMP=ZERO),
    THM_AIR DISS=_F(
    CP=0.0,
    COEF_HENRY=HENRY
    ),
    THM_INIT=_F(TEMP=300.0,
    PRE1=0.0,
    PRE2=1.E5,
    PORO=1.,
    PRES_VAPE=1000.0,
    ),
    THM_DIFFU=_F(R_GAZ=8.32,
    RHO=2200.0,
    CP=1000.0,
    BIOT_COEF=1.0,
    SATU_PRES=SATUBO,
    D_SATU_PRES=DSATBO,
    PESA_X=0.0,
    PESA_Y=0.0,
    PESA_Z=0.0,
    PERM_IN=KINTBO,
```

```
PERM_LIQU=UNDEMI,  
D_PERM_LIQU_SATU=ZERO,  
PERM_GAZ=UNDEMI,  
D_PERM_SATU_GAZ=ZERO,  
D_PERM_PRES_GAZ=ZERO,  
FICKV_T=ZERO,  
FICKA_T=FICK,  
LAMB_T=ZERO,  
,),);
```

Nous allons maintenant détailler chacun des mots clés. Nous ne nous attacherons pas ici à la partie mécanique – si mécanique il y a - qui dépend de la loi de comportement choisie. On se reportera pour cela à la documentation de `DEFI_MATERIAU` (U4.43.01).

## 2.2.1 Mot clé simple `COMP_THM`

Permet de sélectionner dès la définition du matériau la loi de couplage THM. Les lois possibles sont

```
◆ COMP_THM = / 'LIQU_SATU' ,  
              / 'LIQU_GAZ' ,  
              / 'GAZ' ,  
              / 'LIQU_GAZ_ATM' ,  
              / 'LIQU_AD_GAZ' ,  
              / 'LIQU_VAPE_GAZ' ,  
              / 'LIQU_AD_GAZ_VAPE' ,  
              / 'LIQU_VAPE' ,  
/ 'GAZ'
```

Loi de comportement d'un gaz parfait c'est-à-dire vérifiant la relation  $P/\rho = RT/Mv$  où  $P$  est la pression,  $\rho$  la masse volumique,  $Mv$  la masse molaire,  $R$  la constante des gaz parfaits et  $T$  la température (confer [R7.01.11] pour plus de détails). Pour un milieu saturé uniquement. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU`, sous le mot clé `THM_GAZ`.

```
/ 'LIQU_SATU'
```

Loi de comportement pour un milieu poreux saturé par un seul liquide (Cf. [R7.01.11] pour plus de détails). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU`, sous le mot clé `THM_LIQU`.

```
/ 'LIQU_GAZ_ATM'
```

Loi de comportement pour un milieu poreux non saturé avec un liquide et du gaz à pression atmosphérique (confer [R7.01.11] pour plus de détails). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU`, sous les mots clés `THM_LIQU` et `THM_GAZ`.

```
/ 'LIQU_VAPE_GAZ'
```

Loi de comportement pour un milieu poreux non saturé eau/vapeur/air sec avec changement de phase (confer [R7.01.11] pour plus de détails). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU`, sous les mots clés `THM_LIQU`, `THM_VAPE` et `THM_GAZ`.

```
/ 'LIQU_AD_GAZ_VAPE'
```

Loi de comportement pour un milieu poreux non saturé eau/vapeur/air sec/air dissous avec changement de phase (confer [R7.01.11] pour plus de détails). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU`, sous les mots clés `THM_LIQU`, `THM_VAPE`, `THM_GAZ` et `THM_AIR DISS`.

```
/ 'LIQU_AD_GAZ'
```

Loi de comportement pour un milieu poreux non saturé eau/air sec/air dissous avec changement de phase (confer [R7.01.11] pour plus de détails). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI\_MATERIAU, sous les mots clés THM\_LIQU, THM\_GAZ et THM\_AIR DISS.

/ 'LIQU\_VAPE'

Loi de comportement pour un milieu poreux saturé par un composant présent sous forme liquide ou vapeur avec changement de phase (confer [R7.01.11] pour plus de détails). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI\_MATERIAU, sous les mots clés THM\_LIQU et THM\_VAPE. **Cette loi n'est valable que pour les modélisations de type THVD.**

/ 'LIQU\_GAZ'

Loi de comportement pour un milieu poreux non saturé liquide/gaz sans changement de phase (confer [R7.01.11] pour plus de détails). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI\_MATERIAU, sous les mots clés THM\_LIQU et THM\_GAZ.

Le tableau ci-dessous résume les mots clés obligatoires pour les sous commandes explicitées dans les sections suivantes en fonction de la loi de couplage choisie.

Légendes :  
 O Mot clé Obligatoire  
 T Mot clé obligatoire en Thermique  
   Mot clé inutile pour ce type de loi de couplage  
 F Utile pour la loi mais facultatif (défini par défaut)

	LIQU_SAT U	LIQU_GA Z	GAZ	LIQU_GAZ_A TM	LIQU_VAPE_G AZ	LIQU_AD_G AZ_VAPE	LIQU_AD _GAZ	LIQU_VAPE
<b>THM_INIT</b>	O	O	O	O	O	O	O	O
PRE1	O	O	O	O	O	O	O	O
PRE2		O			O	O	O	
PORO	O	O	O	O	O	O	O	O
TEMP	T	T	T	T	O	O	O	O
PRES_VAPE					O	O	O	O
<b>THM_DIFFU</b>	O	O	O	O	O	O	O	O
R_GAZ		O	O		O	O	O	O
RHO	O	O	O	O	O	O	O	O
BIOT_COEF	O	O	O	O	O	O	O	O
PESA_X	O	O	O	O	O	O	O	O
PESA_Y	O	O	O	O	O	O	O	O
PESA_Z	O	O	O	O	O	O	O	O
<b>Si loi HYDR_UTIL (cf. chapitre 28) :</b>								
SATU_PRES				O	O	O	O	O
D_SATU_PRES				O	O	O	O	O
PERM_LIQU					O	O	O	O
D_PERM_LIQU_SA TU					O	O	O	O
PERM_GAZ					O	O	O	O
D_PERM_SATU_G AZ					O	O	O	O
D_PERM_PRES_G AZ					O	O	O	O
<b>Si loi HYDR_VGM ou HYDR_VGC (cf. chapitre 28) :</b>								
VG_N					O	O	O	O
VG_PR					O	O	O	O
VG_SR					O	O	O	O
VG_SMAX					O	O	O	O
VG_SATUR					O	O	O	O
FICKV_T					O	O		
FICKV_PV					F	F		
FICKV_PG					F	F		
FICKV_S					F	F		
D_FV_T					F	F		
D_FV_PG					F	F		
FICKA_T					O	O	O	
FICKA_PA					F	F	F	
FICKA_PL					F	F	F	
FICKA_S					F	F	F	
D_FA_T					F	F	F	
CP	T	T	T	T	T	T	T	T
PERM_IN/PERM_E ND/PERM_X,PERM	O	O	O	O	O	O	O	O

Y, PERM Z								
LAMB T	T	T	T	T	T	T	T	T
LAMB S								
LAMB PHI								
LAMB CT								
D LB T								
D LB S								
D LB PHI								
<b>THM LIQU</b>	<b>0</b>							
RHO	0	0	0	0	0	0	0	0
UN SUR K	0	0	0	0	0	0	0	0
VISC	0	0	0	0	0	0	0	0
D VISC TEMP	0	0	0	0	0	0	0	0
ALPHA	T	T	T	T	T	T	T	T
CP	T	T	T	T	T	T	T	T
<b>THM GAZ</b>	<b>0</b>							
MASS MOL	0	0	0	0	0	0	0	0
VISC	0	0	0	0	0	0	0	0
D VISC TEMP	0	0	0	0	0	0	0	0
CP		T	T	T	T	T	T	
<b>THM VAPE GAZ</b>	<b>0</b>							
MASS MOL	0	0	0	0	0	0	0	0
CP					0	0	0	0
VISC					0	0	0	0
D VISC TEMP					0	0	0	0
<b>THM AIR DISS</b>	<b>0</b>							
CP					0	0	0	0
COEF_HENRY					0	0	0	0

## 2.2.2 Mot clé facteur THM\_INIT

Pour tous les comportements Thermo-Hydro-Mécaniques, il permet de décrire un état de référence de la structure (cf. [R7.01.10] et [R7.01.11]). Sa syntaxe est la suivante :

```
THM_INIT = _F (
    ◇ TEMP      = temp ,      [R]
    ◆ PRE1      = pre1 ,      [R]
    ◇ PRE2      = pre2 ,      [R]
    ◆ PORO      = poro ,      [R]
    ◇ PRES_VAPE = pvap ,     [R]
)
```

Pour bien comprendre ces données, il faut distinguer les inconnues aux nœuds, que nous appelons  $\{u\}^{ddl}$  et les valeurs définies sous le mot clé THM\_INIT que nous appelons  $p^{ref}$  et  $T^{ref}$

$$\{u\}^{ddl} = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \\ PRE1^{ddl} \\ PRE2^{ddl} \\ T^{ddl} \end{pmatrix}$$

La signification des inconnues PRE1 et PRE2 varie suivant les modèles. En notant  $p_w$  la pression d'eau,  $p_{ad}$  la pression d'air dissous,  $p_{lq}$  la pression de liquide  $p_{lq} = p_w + p_{ad}$ ,  $p_{as}$ ,  $p_{vp}$  la pression de vapeur,  $p_g$  la pression d'air sec et  $p_g = p_{as} + p_{vp}$  la pression totale de gaz et  $p_c = p_g - p_{lq}$  la pression capillaire (aussi appelée succion), on a les significations suivantes des inconnues PRE1 et PRE2

Comportement KIT	LIQU_SATU	LIQU_GAZ_ATM	GAZ	LIQU_VAPE_GAZ
PRE1	$p_{lq}$	$-p_{lq}$	$p_g$	$p_c = p_g - p_{lq}$
PRE2			$p_g$	

Comportement KIT	LIQU_GAZ	LIQU_VAPE	LIQU_AD_GAZ_VAPE ou LIQU_AD_GAZ
PRE1	$p_c = p_g - p_{lq}$	$p_{lq}$	$p_c = p_g - p_{lq}$
PRE2	$p_g$		$p_g$

**Tableau 2.2.3-1 : contenu de PRE1 et PRE2**

On définit alors les pressions et la température « totales » par :

$$p = p^{ddl} + p^{ref} ; T = T^{ddl} + T^{ref}$$

Toutes les valeurs en entrée ou sortie (conditions aux limites ou résultat de IMPR\_RESU ) sont les inconnues nodales  $p^{ddl}$  et  $T^{ddl}$ .

Par contre ce sont les pressions et la température totale qui sont utilisées dans les lois de comportement  $\frac{p}{\rho} = \frac{R}{M}T$  pour les gaz parfaits,  $\frac{d\rho_l}{\rho_l} = \frac{dp_l}{K_l} - 3\alpha_l dT$  pour le liquide et dans la relation saturation/pression capillaire.

Notons que les valeurs nodales peuvent être initialisées par le mot clé ETAT\_INIT de la commande STAT\_NON\_LINE (cf. 2.3).

L'utilisateur doit être très prudent dans la définition des valeurs de THM\_INIT : en effet, la définition de plusieurs matériaux avec des valeurs différentes des quantités définies sous THM\_INIT conduit à des valeurs initiales discontinues de la pression et de la température, ce qui n'est en fait pas compatible avec le traitement général qui est fait de ces quantités. Nous conseillons donc à l'utilisateur la démarche suivante :

- si on a initialement un champ uniforme de pression ou de température, on le renseigne directement par le mot clé THM\_INIT,
- si on a un champ non uniforme, on définit par exemple une référence par le mot clé THM\_INIT de la commande DEFI\_MATERIAU, et les valeurs initiales par rapport à cette référence par le mot clé ETAT\_INIT de la commande STAT\_NON\_LINE (cf. 2.3).

◇ TEMP

Température de référence  $T_{ref}$ . Elle est nécessaire pour les modélisations thermiques ainsi que pour toutes les lois de comportement avec gaz. Pour les modélisations avec vapeur, elle correspond à la température à laquelle est calculée la pression de vapeur saturante. Cette valeur est exprimée en Kelvin et doit toujours être strictement positive.

**La valeur de la température de référence entrée derrière le mot clé TEMP\_REF de la commande AFFE\_MATERIAU est ignorée.**

◆ PRE1

Comme vu dans le tableau 1 :

Pour les comportements LIQU\_SATU , et LIQU\_VAPE pression de liquide de référence.

Pour le comportement GAZ pression de gaz de référence. Dans ce cas elle doit être non nulle.

Pour le comportement LIQU\_GAZ\_ATM pression de liquide de référence changée de signe.

Pour les comportements LIQU\_VAPE\_GAZ , LIQU\_AD\_GAZ, LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE et LIQU\_GAZ pression capillaire de référence.

◇ PRE2

Pour les comportements LIQU\_VAPE\_GAZ, LIQU\_AD\_GAZ, LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE et LIQU\_GAZ pression de gaz de référence. Cette valeur doit être non nulle.

- ◆ PORO
- ◆ Porosité initiale.
- ◆ PRES\_VAPE
- ◆ Pression de vapeur de référence pour les comportements : LIQU\_VAPE\_GAZ, LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE et LIQU\_VAPE.

### Remarques :

La pression initiale de vapeur doit être prise en cohérence avec les autres données. Bien souvent, on part de la connaissance d'un état initial d'hygrométrie. Le degré hygrométrique est le rapport entre la pression de vapeur et la pression de vapeur saturante à la température considérée. On utilise alors la loi de Kelvin qui donne la pression du liquide en fonction de la pression de vapeur, de la température et de la pression de vapeur saturante : 
$$\frac{p_w - p_w^{ref}}{\rho_w} = \frac{R}{M_{vp}^{ol}} T \ln \left( \frac{p_{vp}}{p_{vp}^{sat}(T)} \right)$$
. Cette relation n'est valable que pour des évolutions isothermes. On souligne que  $p_w^{ref}$  correspond à un état d'équilibre auquel correspond  $p_{pv}^{sat}$ , cet état d'équilibre correspond en fait à  $p_w^0 = p_{gz}^0 = 1 \text{ atm}$ . Pour des évolutions avec variation de température, connaissant une loi donnant la pression de vapeur saturante à la température  $T_0$ , par exemple : 
$$p_{pv}^{sat}(T_0) = 10^{\left( 2.7858 + \frac{T_0 - 273.5}{31.559 + 0.1354(T_0 - 273.5)} \right)}$$
, et un degré d'hygrométrie  $HR$ , on en déduit la pression de vapeur grâce à  $p_{pv}(T_0) = HR p_{pv}^{sat}(T_0)$ . En outre, il ne faut jamais prendre une valeur de PRES\_VAPE égale à zéro.

## 2.2.3 Mot clé facteur THM\_LIQU

Ce mot clé concerne tous les comportements THM faisant intervenir un liquide (confer [R7.01.11]). Sa syntaxe est la suivante :

```
THM_LIQU = _F (
    ◆ RHO                = rho ,          [R]
    ◆ UN_SUR_K           = usk ,          [R]
    ◆ VISC                = vi ,          [fonction **]
    ◆ D_VISC_TEMP        = dvi ,          [fonction **]
    ◇ ALPHA              = alp ,          [R]
    ◇ CP                 = cp ,          [R]
)
```

- ◆ RHO  
Masse volumique du liquide pour la pression définie sous le mot clé PRE1 du mot clé facteur THM\_INIT.
- ◆ UN\_SUR\_K  
Inverse de la compressibilité du liquide :  $K_l$ .
- ◆ VISC [fonction\*\*]  
Viscosité du liquide. Fonction de la température.
- ◆ D\_VISC\_TEMP [fonction\*\*]  
Dérivée de la viscosité du liquide par rapport à la température. Fonction de la température. L'utilisateur doit assurer la cohérence avec la fonction associée à VISC.

◇ ALPHA

Coefficient de dilatation (linéique) du liquide  $\alpha_l$

Si  $p_l$  désigne la pression du liquide,  $\rho_l$  sa masse volumique et  $T$  la température, le

comportement du liquide est : 
$$\frac{d\rho_l}{\rho_l} = \frac{dp_l}{K_l} - 3\alpha_l dT$$

◇ CP

Chaleur massique à pression constante du liquide.

## 2.2.4 Mot clé facteur THM\_GAZ

Ce mot clé facteur concerne tous les comportements THM faisant intervenir un gaz (cf. [R7.01.11]). Pour les comportements faisant intervenir à la fois un liquide et un gaz, et quand on prend en compte l'évaporation du liquide, les coefficients renseignés ici concernent le gaz sec. Les propriétés de la vapeur seront renseignées sous le mot clé THM\_VAPE\_GAZ. Sa syntaxe est la suivante :

THM\_GAZ = \_F (

```
    ◆ MASS_MOL      = Mgs ,      [R]
    ◆ CP            = cp   ,      [R]
    ◆ VISC          = vi   ,      [fonction **]
    ◆ D_VISC_TEMP  = dvi  ,      [fonction **]
)
```

◆ MASS\_MOL

Masse molaire du gaz sec.  $M_{gs}$

Si  $p_{gs}$  désigne la pression du gaz sec,  $\rho_{gs}$  sa masse volumique,  $R$  la constante des gaz

parfaits et  $T$  la température, le comportement du gaz sec est : 
$$\frac{p_{gs}}{\rho_{gs}} = \frac{RT}{M_{gs}}$$

◆ CP

Chaleur massique à pression constante du gaz sec.

◆ VISC [fonction\*\*]

Viscosité du gaz sec. Fonction de la température.

◆ D\_VISC\_TEMP [fonction\*\*]

Dérivée par rapport à la température de la viscosité du gaz sec. Fonction de la température.  
L'utilisateur doit assurer la cohérence avec la fonction associée à VISC.

## 2.2.5 Mot clé facteur THM\_VAPE\_GAZ

Ce mot clé facteur concerne tous les comportements THM faisant intervenir à la fois un liquide et un gaz, et prenant en compte l'évaporation du liquide (cf. [R7.01.11]). Les coefficients renseignés ici concernent la vapeur. La syntaxe est la suivante :

THM\_VAPE\_GAZ = \_F (

```
    ◆ MASS_MOL      = m    ,      [R]
    ◆ CP            = cp   ,      [R]
    ◆ VISC          = vi   ,      [fonction **]
    ◆ D_VISC_TEMP  = dvi  ,      [fonction **]
)
```

◆ MASS\_MOL

Masse molaire de la vapeur.  $M_{vp}$

- ◆ CP  
Chaleur massique à pression constante de la vapeur.
- ◆ VISC [fonction\*\*]  
Viscosité de la vapeur. Fonction de la température.
- ◆ D\_VISC\_TEMP [fonction\*\*]  
Dérivée par rapport à la température de la viscosité de la vapeur. Fonction de la température.  
L'utilisateur doit assurer la cohérence avec la fonction associée à VISC.

## 2.2.6 Mot clé facteur THM\_AIR\_DISS

Ce mot clé facteur concerne le comportement THM THM\_AIR\_DISS prenant en compte la dissolution de l'air dans le liquide (cf. [R7.01.11]). Les coefficients renseignés ici concernent l'air dissous. La syntaxe est la suivante :

```
THM_AIR_DISS = _F (
    ◆ CP          = cp      , [R]
    ◆ COEF_HENRY = kh      , [fonction **]
)
```

- ◆ CP  
Chaleur massique à pression constante de l'air dissous.

- ◆ COEF\_HENRY

Constante de Henry  $K_H$ , permettant de relier la concentration molaire d'air dissous  $C_{ad}^{ol}$  (moles/m<sup>3</sup>) à la pression d'air sec :

$$C_{ad}^{ol} = \frac{p_{as}}{K_H}$$

### Remarque :

La constante de Henry que nous utilisons ici s'exprime en  $Pa \cdot m^3 \cdot mol^{-1}$ . Dans la littérature il existe différentes manières d'écrire la loi de Henry. Par exemple dans les Benchmarks de l'Andra, la loi de Henry est donnée par  $\omega_l^a = \frac{P_{as}}{H} \frac{M_{as}^{ol}}{M_w} \rho_w$  avec la concentration d'air dans l'eau que l'on peut ramener à une masse volumique telle que  $\omega_l^a = \rho_{ad}$ .  $H$  est un coefficient qui s'exprime en  $Pa$ . Il faudra dans ces cas écrire l'équivalence  $K_H = H \frac{M_w}{\rho_w}$

## 2.2.7 Mot clé facteur THM\_DIFFU

Obligatoire pour tous les comportements THM (cf. [R7.01.11]). L'utilisateur doit s'assurer de la cohérence des fonctions et de leur dérivée. La syntaxe est la suivante :

```
THM_DIFFU = _F (
    ◆ R_GAZ          = rgaz , [R]
    ◆ RHO            = rho  , [R]
    ◆ CP             = cp   , [R]
    ◆ BIOT_COEF      = bio  , [R]
    ◆ PESA_X         = px   , [R]
)
```

```

♦ PESA_Y           = py ,           [R]
♦ PESA_Z           = pz ,           [R]
♦ /PERM_IN         = perm ,         [fonction]
  /|PERMIN_X       = ox ,           [fonction]
  |PERMIN_Y        = oy ,           [fonction]
  |PERMIN_Z        = ox ,           [fonction]
♦ /  ♦ SATU_PRES    = sp ,           [fonction]
  ♦ D_SATU_PRES    = dsp ,          [fonction]
  ♦ PERM_LIQU      = perml ,        [fonction]
  ♦ D_PERM_LIQU_SATU = dperm ,      [fonction]
  ♦ PERM_GAZ       = permg ,        [fonction]
  ♦ D_PERM_SATU_GAZ = dspg ,        [fonction]
  ♦ D_PERM_PRES_GAZ = dppg ,        [fonction]
  /  ♦ VG_N         = vgn ,          [R]
  ♦ VG_PR          = pr ,           [R]
  ♦ VG_SR          = sr ,           [R]
  ♦ VG_SMAX        = smax ,         [R]
  ♦ VG_SATUR       = stur ,         [R]

♦ FICKV_T          = fvt ,           [fonction]
♦ FICKV_PV         = / fvpv ,       [fonction]
  / 1 ,             [DEFAULT]
♦ FICKV_PG         = / fvpg ,       [fonction]
  / 1 ,             [DEFAULT]
♦ FICKV_S          = / fvs ,         [fonction]
  / 1 ,             [DEFAULT]
♦ D_FV_T           = / dfvt ,       [fonction]
  / 0 ,             [DEFAULT]
♦ D_FV_PG          = / dfvgp ,      [fonction]
  / 0 ,             [DEFAULT]
♦ FICKA_T          = fat ,           [fonction]
♦ FICKA_PA         = / fapv ,       [fonction]
  / 1 ,             [DEFAULT]
♦ FICKA_PL         = / fapg ,       [fonction]
  / 1 ,             [DEFAULT]
♦ FICKA_S          = / fas ,         [fonction]
  / 1 ,             [DEFAULT]
♦ D_FA_T           = / dfat ,       [fonction]
  / 0 ,             [DEFAULT]
♦ LAMB_T           = / lambt ,      [fonction]
  / 0 ,             [DEFAULT]
♦ LAMB_S           = / lambs ,      [fonction]
  / 1 ,             [DEFAULT]
♦ LAMB_PHI         = / lambp ,      [fonction]
  / 1 ,             [DEFAULT]
♦ LAMB_CT          = / lambct ,     [fonction]
  / 0 ,             [DEFAULT]
♦ D_LB_S           = / dlambs ,     [fonction]
  / 0 ,             [DEFAULT]
♦ D_LB_T           = / dlambt ,     [fonction]
  / 0 ,             [DEFAULT]
♦ D_LB_PHI         = / dlambp ,     [fonction]
  / 0 ,             [DEFAULT]
♦ EMMAG            = em ,           [R]
)

```

♦ R\_GAZ

Constante des gaz parfaits.

## ◆ RHO

Pour les comportements hydrauliques masse volumique homogénéisée initiale [R7.01.11].

## ◇ CP

Pour les comportements thermiques, chaleur massique à contrainte constante du solide seul (des grains).

**Remarque :**

*Attention il s'agit ici de la chaleur massique uniquement et non pas de «  $\rho C_p$  », comme c'est fait pour d'autres commandes thermiques. La masse volumique des grains est calculée dans le code à partir de la masse volumique homogénéisée [R7.01.11].*

## ◆ BIOT\_COEF

Coefficient de Biot.

## ◆ PESA\_X, PESA\_Y, PESA\_Z

Pesanteur selon x, y et z

**Remarque :**

*La pesanteur définie ici est celle utilisée dans l'équation de Darcy uniquement. Quand il y a des calculs mécaniques, la pesanteur est également définie dans `AFPE_CHAR_MECA`. Cette remarque s'applique bien sur pour les trois composantes de la pesanteur.*

## ◇ PERM\_IN [fonction\*\*]

Perméabilité intrinsèque fonction de la porosité dans le cas isotrope.

La perméabilité au sens classique  $K$ , dont la dimension est celle d'une vitesse se calcule de la façon suivante :

$$K = \frac{K_{int} K_{rel}}{m} \rho_l g \text{ où } K_{int} \text{ est la perméabilité intrinsèque, } K_{rel} \text{ la perméabilité relative, } m \text{ la}$$

viscosité,  $\rho_l$  la masse volumique du liquide et  $g$  l'accélération de la pesanteur.

## ◇ PERMIN\_X, PERMIN\_Y, PERMIN\_Z [fonction\*\*]

Dans le cas orthotrope, composantes en x,y,z du tenseur de perméabilité intrinsèque. Dans ce cas, les 3 sont obligatoires.

## ◇ SATU\_PRES [fonction\*\*]

Pour les comportements de matériaux non saturés (`LIQU_VAPE_GAZ`, `LIQU_GAZ`, `LIQU_GAZ_ATM`, `LIQU_AD_GAZ`, `LIQU_AD_GAZ_VAPE`), isotherme de saturation fonction de la pression capillaire. Uniquement pour les lois de couplage `HYDR_UTIL` ou `HYDR_ENDO` (voir section 28).

**Remarque :**

*Pour des raisons numériques, il faut éviter que la saturation atteigne la valeur 1. Aussi il est très fortement recommandé de multiplier la fonction capillaire (comprise généralement entre 0 et 1) par 0,999.*

## ◇ D\_SATU\_PRES [fonction\*\*]

Pour les comportements de matériaux non saturés (`LIQU_VAPE_GAZ`, `LIQU_GAZ`, `LIQU_GAZ_ATM`), dérivée de la saturation par rapport à la pression. Uniquement pour les lois de couplage `HYDR_UTIL` ou `HYDR_ENDO` (voir section 28).

## ◇ PERM\_LIQ [fonction\*\*]

Perméabilité relative au liquide : fonction de la saturation. Uniquement pour les lois de couplage `HYDR_UTIL` ou `HYDR_ENDO` (voir section 28).

- ◇ D\_PERM\_LIQ\_SATU [fonction\*\*]  
Dérivée de la Perméabilité relative au liquide par rapport à la saturation : fonction de la saturation. Uniquement pour les lois de couplage HYDR\_UTIL ou HYDR\_ENDO (voir section 28).
- ◇ PERM\_GAZ [fonction\*\*]  
Perméabilité relative au gaz : fonction de la saturation et de la pression de gaz. Uniquement pour les lois de couplage HYDR\_UTIL ou HYDR\_ENDO (voir section 28).
- ◇ D\_PERM\_SATU\_GAZ [fonction\*\*]  
Dérivée de la perméabilité au gaz par rapport a la saturation : fonction de la saturation et de la pression de gaz. Uniquement pour les lois de couplage HYDR\_UTIL ou HYDR\_ENDO (voir section 28).
- ◇ D\_PERM\_PRES\_GAZ [fonction\*\*]  
Dérivée de la perméabilité au gaz par rapport a la pression de gaz : fonction de la saturation et de la pression de gaz. Uniquement pour les lois de couplage HYDR\_UTIL ou HYDR\_ENDO (voir section 28).
- ◇ VG\_N [I]  
Pour les comportements de matériaux non saturés ( LIQU\_VAPE\_GAZ , LIQU\_AD\_GAZ , LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE , LIQU\_GAZ , LIQU\_GAZ\_ATM ) et dans le cas où la loi hydraulique est HYDR\_VGM ou HYDR\_VGC (voir section 28 ), désigne le paramètre  $N$  de la loi de Mualem Van-Genuchten servant à définir la pression capillaire et les perméabilités relatives à l'eau et au gaz.
- ◇ VG\_PR [R]  
Pour les comportements de matériaux non saturés( LIQU\_VAPE\_GAZ , LIQU\_AD\_GAZ , LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE , LIQU\_GAZ , LIQU\_GAZ\_ATM ) et dans le cas où la loi hydraulique est HYDR\_VGM ou HYDR\_VGC (voir section 28 ), désigne le paramètre  $Pr$  de la loi de Mualem Van-Genuchten servant à définir la pression capillaire et les perméabilités relatives à l'eau et au gaz.
- ◇ VG\_SR [R]  
Pour les comportements de matériaux non saturés ( LIQU\_VAPE\_GAZ , LIQU\_AD\_GAZ , LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE , LIQU\_GAZ , LIQU\_GAZ\_ATM ) et dans le cas où la loi hydraulique est HYDR\_VGM ou HYDR\_VGC (voir section 28 ), désigne le paramètre  $Sr$  de saturation résiduelle de la loi de Mualem Van-Genuchten servant à définir la pression capillaire et les perméabilités relatives à l'eau et au gaz.
- ◇ VG\_SMAX [R]  
Pour les comportements de matériaux non saturés ( LIQU\_VAPE\_GAZ , LIQU\_AD\_GAZ , LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE , LIQU\_GAZ , LIQU\_GAZ\_ATM ) et dans le cas où la loi hydraulique est HYDR\_VGM ou HYDR\_VGC (voir section 28 ), désigne la saturation maximum pour laquelle on applique la loi de Mualem Van-Genuchten. Au delà de cette saturation les courbes de Mualem-Van Genuchten sont interpolées. Cette valeur doit être très proche de 1.
- ◇ VG\_SATUR [R]  
Pour les comportements de matériaux non saturés ( LIQU\_VAPE\_GAZ , LIQU\_AD\_GAZ , LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE , LIQU\_GAZ , LIQU\_GAZ\_ATM ) et dans le cas où la loi hydraulique est HYDR\_VGM ou HYDR\_VGC (voir section 28 ). Au delà de la saturation définie par VG\_SMAX, la saturation est multipliée par ce facteur correctif. Cette valeur doit être très proche de 1 (voir doc. R7.01.11).
- ◇ FICKV\_T [fonction\*\*]

Pour les comportements `LIQU_VAPE_GAZ` et `LIQU_AD_GAZ_VAPE`, partie multiplicative du coefficient de Fick fonction de la température pour la diffusion de la vapeur dans le mélange gazeux. Le coefficient de Fick pouvant être fonction de la saturation, la température, la pression de gaz et la pression de vapeur, on le définit comme un produit de 4 fonctions : `FICKV_T`, `FICKV_S`, `FICKV_PG`, `FICKV_VP`. Seul `FICKV_T` est obligatoire pour les comportements `LIQU_VAPE_GAZ` et `LIQU_AD_GAZ_VAPE`. Voir remarque en section 20.

◇ `FICKV_S` [fonction\*\*]

Pour les comportements `LIQU_VAPE_GAZ` et `LIQU_AD_GAZ_VAPE`, partie multiplicative du coefficient de Fick fonction de la saturation pour la diffusion de la vapeur dans le mélange gazeux. Dans le cas où on utilise cette fonction, on recommande de prendre `FICKV_S(1) = 0`. Voir remarque en section 20.

◇ `FICKV_PG` [fonction\*\*]

Pour les comportements `LIQU_VAPE_GAZ` et `LIQU_AD_GAZ_VAPE`, partie multiplicative du coefficient de Fick fonction de la pression de gaz pour la diffusion de la vapeur dans le mélange gazeux. Voir remarque en section 20.

◇ `FICKV_PV` [fonction\*\*]

Pour les comportements `LIQU_VAPE_GAZ` et `LIQU_AD_GAZ_VAPE`, partie multiplicative du coefficient de Fick fonction de la pression de vapeur pour la diffusion de la vapeur dans le mélange gazeux. Voir remarque en section 20.

◇ `D_FV_T` [fonction\*\*]

Pour les comportements `LIQU_VAPE_GAZ` et `LIQU_AD_GAZ_VAPE`, dérivée du coefficient `FICKV_T` par rapport à la température. Voir remarque en section 20.

◇ `D_FV_PG` [fonction\*\*]

Pour les comportements `LIQU_VAPE_GAZ` et `LIQU_AD_GAZ_VAPE`, dérivée du coefficient `FICKV_PG` par rapport à la pression de gaz. Voir remarque en section 20.

◇ `FICKA_T` [fonction\*\*]

Pour les comportement `LIQU_AD_GAZ_VAPE` et `LIQU_AD_GAZ`, partie multiplicative du coefficient de Fick fonction de la température pour la diffusion de l'air dissous dans le mélange liquide. Le coefficient de Fick pouvant être fonction de la saturation, la température, la pression d'air dissous et la pression de liquide, on le définit comme un produit de 4 fonctions : `FICKA_T`, `FICKA_S`, `FICKV_PA`, `FICKV_PL`. Dans le cas de `LIQU_AD_GAZ_VAPE`, seul `FICKA_T` est obligatoire. Voir remarque en section 20.

◇ `FICKA_S` [fonction\*\*]

Pour les comportement `LIQU_AD_GAZ_VAPE` et `LIQU_AD_GAZ`, partie multiplicative du coefficient de Fick fonction de la saturation pour la diffusion de l'air dissous dans le mélange liquide. Voir remarque en section 20.

◇ `FICKA_PA` [fonction\*\*]

Pour les comportement `LIQU_AD_GAZ_VAPE` et `LIQU_AD_GAZ`, partie multiplicative du coefficient de Fick fonction de la pression d'air dissous pour la diffusion de l'air dissous dans le mélange liquide. Voir remarque en section 20.

◇ `FICKA_PL` [fonction\*\*]

Pour les comportement `LIQU_AD_GAZ_VAPE` et `LIQU_AD_GAZ`, partie multiplicative du coefficient de Fick fonction de la pression de liquide pour la diffusion de l'air dissous dans le mélange liquide. Voir remarque en section 20.

◇ `D_FA_T` [fonction\*\*]

Pour les comportement LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE et LIQU\_AD\_GAZ, dérivée du coefficient FICKA\_T par rapport à la température. Voir remarque en section 20.

- ◇ LAMB\_T [fonction\*\*]  
Partie multiplicative de la conductivité thermique du mélange dépendant de la température (Voir remarque en section 20.). Cette opérande est obligatoire dans le cas thermique.
- ◇ LAMB\_S [fonction\*\*]  
Partie multiplicative (égale à 1 par défaut) de la conductivité thermique du mélange dépendant de la saturation (Voir remarque en section 20).
- ◇ LAMB\_PHI [fonction\*\*]  
Partie multiplicative (égale à 1 par défaut) de la conductivité thermique du mélange dépendant de la porosité (cf. [§2.2.9]).
- ◇ LAMB\_CT [fonction\*\*]  
Partie de la conductivité thermique du mélange constante et additive (cf. [§2.2.9]). Cette constante est égale à zéro par défaut.
- ◇ D\_LB\_T [fonction\*\*]  
Dérivée de la partie de la conductivité thermique du mélange dépendant de la température par rapport a la température.
- ◇ D\_LB\_S [fonction\*\*]  
Dérivée de la partie de la conductivité thermique du mélange dépendant de la saturation.
- ◇ D\_LB\_PHI [fonction\*\*]  
Dérivée de la partie de la conductivité thermique du mélange dépendant de la porosité.
- ◇ EMMAG [fonction\*\*]  
Coefficient d'emmagasinement. Ce coefficient n'est pris en compte que dans les cas des modélisations sans mécanique.

## 2.2.8 Récapitulatif des fonctions de couplages et leur dépendance

Les tableaux ci-dessous rappellent les différentes fonctions et leurs éventuelles dépendances et obligations.

### Mot clé facteur THM\_LIQU

◆	RHO	$\rho_{lq}^0$
		$1$
◆	UN_SUR_K	$K_{lq}$
		$\alpha_{lq}$
◇	ALPHA	$C_{lq}^p$
		$\mu_{lq}(T)$
◆	VISC	$\mu_{lq}(T)$
		$\frac{\partial \mu_{lq}(T)}{\partial T}$
◆	D_VISC_TEMP	$\frac{\partial \mu_{lq}(T)}{\partial T}$

### Mot clé facteur THM\_GAZ

◆	MASS_MOL	$M_{as}^{ol}$
		$C_{as}^p$
◇	CP	$C_{as}^p$

◆	VISC	$\mu_{as}(T)$
◆	D_VISC_TEMP	$\frac{\partial \mu_{as}(T)}{\partial T}$

## Mot clé facteur THM\_VAPE\_GAZ

◆	MASS_MOL	$M_{VP}^{ol}$
◆	CP	$C_{vp}^p$
◆	VISC	$\mu_{vp}(T)$
◆	D_VISC_TEMP	$\frac{\partial \mu_{vp}(T)}{\partial T}$

## Mot clé facteur THM\_AIR\_DISS

◆	CP	$C_{ad}^p$
◆	COEF_HENRY	$K_H$

## Mot clé facteur THM\_INIT

◇	TEMP	$^{init} T$
◆	PRE1	$^{init} P_1$
◇	PRE2	$^{init} P_2$
◆	PORO	$\phi^0$
◇	PRES_VAPE	$p_{vp}^0$

## •Mot clé facteur THM\_DIFFU

◇	R_GAZ	$R$
◆	RHO	$r_0$
◇	CP	$C_{\sigma}^s$
◆	BIOT_COEF	$b$
◇	SATU_PRES	$S_{lq}(p_c)$
◇	D_SATU_PRES	$\frac{\partial S_{lq}(p_c)}{\partial p_c}$
◆	PESA_X	$F_x^m$
◆	PESA_Y	$F_y^m$
◆	PESA_Z	$F_z^m$
◇	PERM_IN	$K^{int}(\phi)$
◇	PERM_LIQU	$k_{lq}^{rel}(S_{lq})$
◇	D_PERM_LIQU_SATU	$\frac{\partial k_{lq}^{rel}(S_{lq})}{\partial S_{lq}}$
◇	PERM_GAZ	$k_{gz}^{rel}(S_{lq}, p_{gz})$

◇	D_PERM_SATU_GAZ	$\frac{\partial k_{gz}^{rel}(S_{lq}, P_{gz})}{\partial S_{lq}}$
◇	D_PERM_PRES_GAZ	$\frac{\partial k_{gz}^{rel}(S_{lq}, P_{gz})}{\partial P_{gz}}$
◇	FICKV_T	$f_{vp}^T(T)$
◇	FICKV_S	$f_{vp}^S(S)$
◇	FICKV_PG	$f_{vp}^{gz}(P_g)$
◇	FICKV_PV	$f_{vp}^{vp}(P_{vp})$
◇	D_FV_T	$\frac{\partial f_{vp}^T(T)}{\partial T}$
◇	D_FV_PG	$\frac{\partial f_{vp}^{gz}(P_{gz})}{\partial P_{gz}}$
◇	FICKA_T	$f_{ad}^T(T)$
◇	FICKA_S	$f_{ad}^S(S)$
◇	FICKA_PA	$f_{ad}^{ad}(P_{ad})$
◇	FICKA_PL	$f_{ad}^{lq}(P_{lq})$
◇	D_FA_T	$\frac{\partial f_{ad}^T(T)}{\partial T}$
◇	LAMB_T	$\lambda_T^T(T)$
◇	D_LB_T	$\frac{\partial \lambda_T^T(T)}{\partial T}$
◇	LAMB_PHI	$\lambda_\varphi^T(\varphi)$
◇	D_LB_PHI	
◇	LAMB_S	$\lambda_S^T(S)$
◇	D_LB_S	$\frac{\partial \lambda_S^T(S)}{\partial S}$
◇	LAMB_CT	$\lambda_{CT}^T$

## Remarque :

Dans le cas où il y a de la thermique :

$\lambda^T$  est fonction de la porosité, de la saturation et de la température et est donnée sous la forme du produit de trois fonctions :

$\lambda^T = \lambda_\varphi^T(\varphi) \cdot \lambda_S^T(S_{lq}) \cdot \lambda_T^T(T) + \lambda_{cte}^T$  avec  $\lambda_T^T(T)$  (c.a.d  $LAMB\_T$ ) obligatoire et les autres fonctions par défaut prises égales à un, sauf  $\lambda_{cte}^T = 0$ .

Pour le coefficient de Fick du mélange gazeux, dans le cas  $LIQU\_VAPE\_GAZ$  et  $LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE$   $F_{vp}(P_{vp}, P_{gz}, T, S) = f_{vp}^{vp}(P_{vp}) \cdot f_{vp}^{gz}(P_{gz}) \cdot f_{vp}^T(T) \cdot f_{vp}^S(S)$  avec

$f_{vp}^T(T)$  obligatoire, les autres fonctions étant prises par défaut égales à un, et les dérivées égales à zéro. On négligera les dérivées par rapport à la pression de vapeur et à la saturation.

Dans les cas `LIQU_AD_GAZ_VAPE` et `LIQU_AD_GAZ`, le coefficient de Fick du mélange liquide sera sous la forme :  $F_{ad}(P_{ad}, P_{lq}, T, S) = f_{ad}^{ad}(P_{ad}) \cdot f_{ad}^{lq}(P_{lq}) \cdot f_{ad}^T(T) \cdot f_{ad}^S(S)$ , avec  $f_{ad}^T(T)$  obligatoire, les autres fonctions étant prises par défaut égales à un, et la dérivée égale à zéro. On ne considère que la dérivée par rapport à la température (les autres sont de toutes façons prises égales à zéro).

## 2.3 Initialisation du calcul

Pour définir un état initial, il faut définir un état de contraintes généralisées (aux éléments), des inconnues nodales et des variables internes.

- Dans le mot clé THM\_INIT de DEFI\_MATERIAU , on définit des valeurs de référence pour les inconnues nodales.
- Par le mot clé DEPL du mot clé facteur ETAT\_INIT de la commande STAT\_NON\_LINE, on affecte le champ d'initialisation des inconnues nodales.
- Par le mot clé SIGM du mot clé facteur ETAT\_INIT de la commande STAT\_NON\_LINE , on affecte le champs d'initialisation des contraintes.
- Par le mot clé VARI du mot clé facteur ETAT\_INIT on affecte (éventuellement) le champs d'initialisation des variables internes.

Afin de préciser les choses, on rappelle à quelle catégorie de variables appartient chaque grandeur physique (ces grandeurs physiques existant ou non suivant la modélisation choisie) :

<b>Inconnues nodales</b>	$p_c, p_g, p_{lq}, T, u_x, u_y, u_z$
<b>Contraintes aux points de Gauss</b>	$\sigma'_{xx}, \sigma'_{yy}, \sigma'_{zz}, \sigma'_{xy}, \sigma'_{xz}, \sigma'_{yz}, \sigma'_p,$ $m_w, M_{w_x}, M_{w_y}, M_{w_z}, m_{vp}, M_{vp_x}, M_{vp_y}, M_{vp_z}, m_{as}, M_{as_x}, M_{as_y}, M_{as_z},$ $m_{ad}, M_{ad_x}, M_{ad_y}, M_{ad_z}, h_w^m, h_{vp}^m, h_{as}^m, h_{ad}^m, Q', q_x, q_y, q_z$
<b>Variables internes</b>	$\phi, \rho_{lq}, p_{vp}, S_{lq}$

La correspondance entre nom de composante Aster et grandeur physique est explicitée en [§Annexe 1].

L'initialisation des inconnues nodales ainsi que la différence entre état initial et état de référence ont été décrites et détaillées dans la section 11. On rappelle néanmoins que  $p = p^{ddl} + p^{ref}$  pour les pressions PRE1 et PRE2 et  $T = T^{ddl} + T^{ref}$  pour les températures, où  $p^{ref}$  et  $T^{ref}$  sont définis sous le mot clé THM\_INIT de la commande DEFI\_MATERIAU.

Le mot clé DEPL du mot clé facteur ETAT\_INIT de la commande STAT\_NON\_LINE définit les valeurs initiales de  $\{u\}^{ddl}$ . Les valeurs initiales des masses volumiques de la vapeur et de l'air sec sont définies à partir des valeurs initiales des pressions de gaz et de vapeur (valeurs lues sous le mot clé THM\_INIT de la commande DEFI\_MATERIAU). On remarque que, pour les déplacements, la décomposition  $u = u^{ddl} + u^{ref}$  n'est pas faite : le mot clé THM\_INIT de la commande DEFI\_MATERIAU ne permet donc pas de définir des déplacements initiaux. La seule façon d'initialiser les déplacements est donc de leur donner une valeur initiale par le mot clé facteur ETAT\_INIT de la commande STAT\_NON\_LINE.

Concernant les contraintes, les champs à renseigner sont les contraintes indiquées en annexe I suivant la modélisation choisie.

Les valeurs initiales des enthalpies, qui appartiennent aux contraintes généralisées sont définies à partir du mot clé SIGM du mot clé facteur ETAT\_INIT de la commande STAT\_NON\_LINE. L'introduction des conditions initiales est très importante, pour les enthalpies. En pratique, on peut raisonner en considérant que l'on a trois états pour les fluides :

- l'état courant,
- l'état de référence : c'est celui des fluides à l'état libre. Dans cet état de référence, on peut considérer que les enthalpies sont nulles,
- l'état initial : il doit être en équilibre thermodynamique. Pour les enthalpies de l'eau et de la vapeur, on devra prendre :

$$\begin{aligned} {}^{init}h_w^m &= \frac{p_w^{init} - p_l^{ref}}{\rho_w} = \frac{p_w^{init} - p_{atm}}{\rho_w} \\ {}^{init}h_{vp}^m &= L(T^{init}) = \text{chaleur latente de vaporisation} \\ {}^{init}h_{as}^m &= 0 \\ {}^{init}h_{ad}^m &= 0 \end{aligned}$$

et avec  $L(T) = 2500800 - 2443(T - 273.15)$  J/kg

### Remarque :

La pression initiale de vapeur devra être prise en cohérence avec ces choix (cf 13).

Concernant les contraintes mécaniques, la partition des contraintes en contraintes totale et effective s'écrit :

$$\sigma = \sigma' + \sigma_p \mathbf{1}$$

où  $\sigma$  est la contrainte totale, c'est à dire celle qui vérifie :  $\text{Div}(\sigma) + rF^m = 0$

$\sigma'$  est la contrainte effective. Pour les lois de contraintes effectives :  $d\sigma' = f(d\varepsilon - \alpha_0 dT, \alpha)$ , où  $\varepsilon = \frac{1}{2}(\nabla u + {}^T\nabla u)$  et  $\alpha$  représente les variables internes.

$\sigma_p$  se calcule en fonction des pressions hydrauliques. L'écriture adoptée est incrémentale et, si l'on veut que la valeur de  $\sigma_p$  soit cohérente avec la valeur  $p^{ref}$  (PRE1) définie sous le mot clé THM\_INIT, il faut initialiser  $\sigma_p$  par le mot clé SIGM du mot clé facteur ETAT\_INIT de la commande STAT\_NON\_LINE.

### Exemple :

Les champs de déplacements initialisés dans ETAT\_INIT peuvent être définis de la manière suivante :

```
CHAMNO=CREA_CHAMP (MAILLAGE=MAIL,
                    OPERATION='AFFE',
                    TYPE_CHAM='NOEU_DEPL_R',
                    AFFE=( _F(TOUT='OUI',
                               NOM_CMP='TEMP',
                               VALE=0.0, ),
                          _F(GROUP_NO='SURFBO',
                               NOM_CMP='PRE1',
                               VALE=7.E7, ),
                          _F(GROUP_NO='SURFBG',
                               NOM_CMP='PRE1',
                               VALE=3.E7, ),
                          _F(GROUP_NO='SURFBO',
                               NOM_CMP='PRE2',
                               VALE=0.0, ),
                          _F(GROUP_NO='SURFBG',
                               NOM_CMP='PRE2',
                               VALE=0.0, ), ), ), );
```

Et les champs de contrainte de la manière suivante:

```
SIGINIT=CREA_CHAMP (MAILLAGE=MAIL,
                    OPERATION='AFFE',
                    TYPE_CHAM='CART_SIEF_R',
```

```
      AFFE=( _F (GROUP_MA='BO',
                NOM_CMP=
                ('SIXX','SIYY','SIZZ','SIXY','SIXZ',
                'SIYZ','SIP','M11','FH11X','FH11Y','ENT11',
                'M12','FH12X','FH12Y','ENT12',
                'QPRIM','FHTX','FHTY','M21',
                'FH21X','FH21Y','ENT21',
                'M22','FH22X','FH22Y','ENT22',),
                VALE=
                (0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,
                0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,
                0.0,0.0,0.0, 2500000.0,
                0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,
                0.,0.,0.,0.) ,),);
```

## 2.4 Chargements et conditions aux limites

Toutes les conditions aux limites ou chargement sont affectés via la commande `AFFE_CHAR_MECA` [U4.44.01]. Les chargements sont ensuite activés par le mot clé facteur `EXCIT` de la commande `STAT_NON_LINE`.

De manière classique, deux types de conditions aux limites sont possibles :

- Des conditions de type Dirichlet qui consistent à imposer sur une partie de frontière des valeurs fixées pour des inconnues principales appartenant à  $\{u\}^{ddl}$  (et non  $u = u^{ddl} + u^{init}$ ) pour cela on utilise le mot clé facteur `DDL_IMPO` ou `FACE_IMPO` de `AFFE_CHAR_MECA`.
- Des conditions de type Neumann qui consistent à imposer des valeurs aux « quantités duales », soit en ne disant rien (flux nuls en hydraulique et thermique), soit en leur donnant une valeur via les mots clés `FLUN`, `FLUN_HYDR1` et `FLUN_HYDR2` du mot clé facteur `FLUX_THM_REP` de la commande `AFFE_CHAR_MECA`. Ce flux est ensuite multiplié par une fonction du temps (par défaut égale à 1) appelée par `FONC_MULT` dans le sous mot clé `EXCIT` de la commande `STAT_NON_LINE`. `FLUN`, `FLUN_HYDR1` et `FLUN_HYDR2` représentent respectivement les flux thermiques, les flux d'eau et les flux de composant gazeux (cf, fin du paragraphe).
- Les conditions mécaniques en contraintes totales  $\sigma.n$  sont elles données via `PRES_REP` de la commande `AFFE_CHAR_MECA`. On se référera à la documentation de cette commande pour en connaître les possibilités.

D'un point de vue syntaxique les conditions de Dirichlet s'appliquent donc comme sur l'exemple suivant

```
DIRI=AFFE_CHAR_MECA (MODELE=MODELE,
                    DDL_IMPO=( _F (GROUP_NO='GAUCHE',
                                    TEMP=0.0,),
                                _F (TOUT='OUI',
                                    PRE2=0.0,),
                                _F (GROUP_NO='GAUCHE',
                                    PRE1=0.0,),
                                _F (TOUT='OUI',
                                    DX=0.0,),
                                _F (TOUT='OUI',
                                    DY=0.0,),
                                _F (TOUT='OUI',
                                    DZ=0.0,),
                                ),),)
```

Pour les conditions de Neuman, la syntaxe sera alors comme sur l'exemple suivant :

```
NEU1=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=MODELE,
                    FLUX_THM_REP=_F(GROUP_MA='DROIT',
                                    FLUN=200.,
                                    FLUN_HYDR1=0.0,
                                    FLUN_HYDR2=0.0),);
NEU2=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=MODELE,
                    PRES_REP=_F(GROUP_MA='DROIT',
                                 PRES=2.,),);
```

On définit ensuite la fonction multiplicative que l'on veut appliquer, par exemple à *NEU1* :

```
FLUX=DEFI_FONCTION(NOM_PARA='INST',
                  VALE=
                  (0.0, 386.0,
                  315360000.0, 312.0,
                  946080000.0, 12.6),);
```

Les chargements sont ensuite activés dans *STAT\_NON\_LINE* via le mot clé *EXCIT* de la manière suivante :

```
EXCIT=(
      _F(CHARGE=DIRI, ),
      _F(CHARGE=NEU2, ),
      _F(CHARGE=NEU1,
         FONC_MULT=FLUX, ),
      ),
```

*FLUN* correspond à la valeur du flux de chaleur ; *FLUN\_HYDR1* et *FLUN\_HYDR2* correspondent aux valeurs des flux hydrauliques associés aux pressions *PRE1* et *PRE2*. S'il n'y a pas d'ambiguïté pour la thermique ou la mécanique, en revanche les inconnues principales hydrauliques *PRE1* et *PRE2* changent suivant le couplage choisi. Comme on le rappelle ci-dessous

Comportement	LIQU_SATU	LIQU_VAPE	LIQU_GAZ_ATM	GAZ	LIQU_VAPE_GAZ LIQU_GAZ LIQU_AD_GAZ_VA PE LIQU AD GAZ
<i>PRE1</i>	$P_{lq}$	$P_{lq}$	$-P_{lq}$	$P_g$	$P_c = P_g - P_{lq}$
<i>PRE2</i>					$P_g$

Les flux associés sont :

$$\text{Pour } PRE1, FLUN\_HYDR1 : (M_w + M_{vp}) \cdot n = M_w^{ext} + M_{vp}^{ext}$$

$$\text{Pour } PRE2, FLUN\_HYDR2 : (M_{ad} + M_{as}) \cdot n = M_{ad}^{ext} + M_{as}^{ext}$$

Nous allons donc résumer les diverses possibilités en distinguant le cas où on impose des valeurs à *PRE1* et/ou *PRE2* et celui où on travaille sur des combinaisons des 2. On signale qu'on peut bien sûr avoir différents types de conditions aux limites suivant les morceaux de frontière (groupes de nœuds ou de mailles) que l'on traite. Pour un aperçu plus complet et plus détaillé de la manière dont sont traitées les conditions aux limites dans le cas non saturé, on se reportera à la note reproduite dans l'annexe 2.

- **Cas des conditions aux limites faisant intervenir les inconnues principales *PRE1* et *PRE2***

On résume ici le cas habituel où on impose des valeurs à *PRE1* et/ou *PRE2*.

- Dirichlet sur `PRE1` et Dirichlet sur `PRE2`  
L'utilisateur impose une valeur à `PRE1` et `PRE2` ; les flux sont des résultats de calcul.
  - Dirichlet sur `PRE1` et Neuman sur `PRE2`  
L'utilisateur impose une valeur à `PRE1` et une valeur au flux associé à `PRE2` en ne disant rien sur `PRE2` ou en donnant une valeur à `FLUN_HYDR2`.
  - Dirichlet sur `PRE2` et Neuman sur `PRE1`  
L'utilisateur impose une valeur à `PRE2` et une valeur au flux associé à `PRE1` en ne disant rien sur `PRE1` ou en donnant une valeur à `FLUN_HYDR1`.
  - Neuman sur `PRE2` et Neuman sur `PRE1`  
Les deux flux sont imposés soit en ne disant rien sur `PRE1` et/ou `PRE2` (flux nuls) soit en donnant une valeur à `FLUN_HYDR1` et/ou `FLUN_HYDR2`
- **Cas des conditions aux limites faisant intervenir une relation linéaire entre les inconnues principales `PRE1` et `PRE2`**

Il est également possible de manier des combinaisons linéaires de `PRE1` et `PRE2`. Il faut toutefois manier cela avec précaution de manière à partir d'un problème correctement posé. La syntaxe de cet opérateur est détaillée dans la documentation de `AFPE_CHAR_MECA`, l'exemple ci-dessous illustre ce type de condition:

```
P_DDL=AFPE_CHAR_MECA(MODELE=MODELE,  
                      LIAISON_GROUP=( _F(  
                                      GROUP_NO_1= 'BORDS',  
                                      GROUP_NO_2= 'BORDS',  
                                      DDL_1='PRE1',  
                                      DDL_2='PRE2',  
                                      COEF_MULT_1 = x,  
                                      COEF_MULT_2 = y.,  
                                      COEF_IMPO =z,,),),  
                      );
```

Cette commande signifie que sur la frontière définie par le groupe de nœuds `BORDS`, les pressions `PRE1` et `PRE2` sont reliées par la relation linéaire

$$x PRE1 + y PRE2 = z$$

#### Remarque :

Les flux imposés sont des quantités scalaires qui peuvent s'appliquer sur une ligne ou une surface interne au solide modélisé. Dans ce cas, ces conditions aux limites correspondent à une source.

## 2.5 Le calcul non linéaire

La résolution peut être effectuée de 2 manières :

1. la méthode du couplage : c'est la plus fiable, la plus robuste et la plus ancienne
2. la méthode du chaînage : c'est une nouvelle stratégie, adaptée pour les problèmes faiblement couplés et pour les problèmes ne pouvant pas être résolus actuellement par la méthode du couplage.

Ex :

- calcul avec la loi de comportement mécanique '`ENDO_HETEROGENE`', qui n'est pas disponible dans le kit THM
- calcul avec les modélisations hydrauliques diphasiques en volumes finis, qui ne sont pas disponibles dans le kit THM couplées avec la mécanique

Le cœur de la résolution est la commande '`STAT_NON_LINE`'. A cette commande on affecte le modèle (mot clé `MODELE`), les matériaux (mot clé `CHAM_MATER`), le/les chargements (mot clé `EXCIT`)

et l'état initial (mot clé `ETAT_INIT`) que l'on a définis par toutes les commandes décrites précédemment.

Pour les informations générales concernant cette commande et sa syntaxe, on se reportera à sa documentation. On précise juste que la méthode de calcul est une méthode de Newton. On ne parle donc ci-dessous que de ce qui est spécifique aux calculs THM à savoir les mots clés facteurs `RELATION` et `RELATION_KIT` du mot clé `COMP_INCR` qui sont étroitement liés.

### Attention :

Sous le mot clé facteur `NEWTON`, on doit mettre une matrice de type '`TANGENTE`' et non '`ELASTIQUE`' .

On présente d'abord des exemples d'utilisation pour les deux stratégies de résolution.

## 2.5.1 Résolution par couplage

Dans ce cas, la résolution est effectuée par une seule commande `STAT_NON_LINE` :

```
U0=STAT_NON_LINE(MODELE=MODELE,  
CHAM_MATER=CHMAT0,  
EXCIT=(  
_F(CHARGE=T_IMP, ),  
_F(CHARGE=CALINT,  
FONC_MULT=FLUX, ) , ),  
COMP_INCR=_F(RELATION='KIT_THHM',  
RELATION_KIT=  
( 'ELAS', 'LIQU_GAZ' , 'HYDR_UTIL' ) , ),  
ETAT_INIT=_F(DEPL=CHAMNO,  
SIGM=SIGINIT) ,  
INCREMENT=_F(LIST_INST=INST1, ) ,  
NEWTON=_F(MATRICE='TANGENTE', REAC_ITER=1, ) ,  
CONVERGENCE=_F(RESI_GLOB_RELA=1.E-06,  
ITER_GLOB_MAXI=15,  
ITER_INTE_MAXI=5, ) ,  
ARCHIVAGE=_F(PAS_ARCH=1, ) , ) ;
```

## 2.5.2 Résolution par chaînage

La résolution par chaînage s'applique actuellement aux problèmes Hydro-Mécaniques saturés uniquement. On rappelle d'abord les équations de ce problème :

$$\begin{aligned} -\nabla \cdot \sigma'(u) + b \nabla p &= 0 \\ \partial_t(\rho \phi) + \nabla \cdot M_{lq} &= 0 \end{aligned}$$

où la porosité  $\phi$  suit la loi de comportement  $d\phi = bd(\nabla \cdot u) + \frac{b-\phi}{K_s} dp$ .

Dans le cadre du chaînage, on résout séparément les problèmes mécanique et hydraulique. La communication entre les deux calculs s'effectue via des variables de commande ('`PTOT`' et '`DIVU`'). Pour le problème mécanique, la variable de commande '`PTOT`' joue le rôle de la donnée de pression. Pour le problème hydraulique, la variable de commande '`DIVU`' joue le rôle de la donnée de déformation volumique.

Ces variables de commande sont calculées par la commande `CHAINAGE_THM`.

La méthode illustrée ci-dessous est un algorithme basique de chaînage pur de calculs (résolution hydraulique à l'instant 1, résolution mécanique à l'instant 1, résolution hydraulique à l'instant 2, résolution mécanique à l'instant 2, etc ...). On pourrait envisager des algorithmes plus compliqués (de type point fixe ou gradient conjugué non linéaire) mais cela complexifie d'autant la mise en données

dans le fichier de commandes. La question de la convergence de tels algorithmes n'est pas non plus du tout acquise !  
La solution mécanique finale est DEPLA et la solution hydraulique est PRELIQ.

```
# boucle sur les pas de temps
for k in range(1,lenlist) :

    UNPAS=DEFI_LIST_REEL(DEBUT=listinst[k-1],
                        INTERVALLE=_F(JUSQU_A=listinst[k],
                                       NOMBRE=1,));

    UNPASSUB =DEFI_LIST_INST(DEFI_LIST=_F(LIST_INST =UNPAS ),
                             ECHEC=_F(
                                     SUBD_METHODE='MANUEL',
                                     SUBD_PAS = 4,
                                     SUBD_NIVEAU=5,)),);

    if (k>1) :

        DEFVHY=CHAINAGE_THM (RESULTAT=DEPLA, INFO=1,
                             MODELE=MODHYD,
                             MATR_PROJECTION=MATPROJ,
                             TYPE_CHAINAGE='MECA_HYDR',
                             INST=listinst[k,]);

        MATEHY=AFPE_MATERIAU (MAILLAGE=MAIL,
                              AFPE=_F (TOUT='OUI',
                                       MATER=MATERIAU,)),
                              AFPE_VARC=_F (NOM_VARC='DIVU',
                                             EVOL=DEFVHY,)),);

    else :

        MATEHY=AFPE_MATERIAU (MAILLAGE=MAIL,
                              AFPE=_F (TOUT='OUI',
                                       MATER=MATERIAU,)),);

    if (k==1) :

        PRELIQ=STAT_NON_LINE (MODELE=MODHYD,
                              CHAM_MATER=MATEHY,
                              EXCIT=_F (CHARGE=CHARHYD,)),
                              SOLVEUR=_F (METHODE='MUMPS', PCENT_PIVOT=100,)),
                              CONVERGENCE=_F (ITER_GLOB_MAXI=50,)),
                              ARCHIVAGE=_F (LIST_INST=UNPAS,)),
                              COMP_INCR=_F (RELATION='KIT_H',
                                             RELATION_KIT=('LIQU_SATU', 'HYDR_UTIL',)),),
                              INCREMENT=_F (LIST_INST=UNPASSUB,)),);

    else :

        PRELIQ=STAT_NON_LINE (reuse=PRELIQ,
                              MODELE=MODHYD,
                              CHAM_MATER=MATEHY,
                              EXCIT=_F (CHARGE=CHARHYD,)),
                              SOLVEUR=_F (METHODE='MUMPS', PCENT_PIVOT=100,)),
                              ARCHIVAGE=_F (LIST_INST=UNPAS,)),
                              ETAT_INIT=_F (EVOL_NOLI=PRELIQ,
```

```
                INST=listinst[k-1]),
CONVERGENCE=_F(ITER_GLOB_MAXI=50,)),
COMP_INCR=_F(RELATION='KIT_H',
              RELATION_KIT=('LIQU_SATU','HYDR_UTIL',)),),
INCREMENT=_F(LIST_INST=UNPASSUB,)),);

if (k>1) :
    DETRUIRE (INFO=1, CONCEPT=_F (NOM= (REPTOT, MATEME, ), ), ), );

REPTOT=CHAINAGE_THM (RESULTAT=PRELIQ,
                    MODELE=MODMEC,
                    TYPE_CHAINAGE='HYDR_MECA',
                    TYPE_RESU='EVOL_VARC',
                    INST=listinst[k], );

MATEME=AFFE_MATERIAU (MAILLAGE=MAIL,
                     AFPE=_F (TOUT='OUI',
                               MATER=MATERIAU, ),
                     AFPE_VARC=_F (TOUT='OUI',
                                     EVOL=REPTOT,
                                     NOM_VARC='PTOT', ), ), );

if (k==1) :
    DEPLA=STAT_NON_LINE (MODELE=MODMEC,
                        CHAM_MATER=MATEME,
                        EXCIT=_F (CHARGE=CHARMEC, ),
                        COMP_INCR=_F (RELATION='ELAS', ),
                        INCREMENT=_F (LIST_INST=UNPASSUB, ),
                        ARCHIVAGE=_F (LIST_INST=UNPAS, ),
                        NEWTON=_F (MATRICE='TANGENTE',
                                   REAC_ITER=10, ),
                        CONVERGENCE=_F (ITER_GLOB_MAXI=10, ),
                        SOLVEUR=_F (METHODE='MUMPS', PCENT_PIVOT=100, ), ), );

else :
    DEPLA=STAT_NON_LINE (reuse=DEPLA,
                        MODELE=MODMEC,
                        CHAM_MATER=MATEME,
                        EXCIT=_F (CHARGE=CHARMEC, ),
                        ARCHIVAGE=_F (LIST_INST=UNPAS, ),
                        COMP_INCR=_F (RELATION='ELAS', ),
                        ETAT_INIT=_F (EVOL_NOLI=DEPLA,
                                      INST=listinst[k-1]),
                                      INCREMENT=_F (LIST_INST=UNPASSUB, ),
                                      NEWTON=_F (MATRICE='TANGENTE',
                                                  REAC_ITER=10, ),
                                      CONVERGENCE=_F (ITER_GLOB_MAXI=10, ),
                                      SOLVEUR=_F (METHODE='MUMPS', PCENT_PIVOT=100, ), ), );

if (k>1) :
    DETRUIRE (INFO=1, CONCEPT=_F (NOM= (DEFVHY, ), ), );
    DETRUIRE (INFO=1, CONCEPT=_F (NOM= (UNPAS, UNPASSUB, MATEHY, ), ), );
```

## 2.5.3 Conseils généraux d'utilisation

RELATION est renseigné par des relations de types KIT\_XXXX qui permettent de résoudre simultanément de deux à quatre équations d'équilibre. Les équations considérées dépendent du suffixe XXXX avec la règle suivante :

- M désigne l'équation d'équilibre mécanique,
- T désigne l'équation d'équilibre thermique,
- H désigne une équation d'équilibre hydraulique,
- V désigne la présence d'une phase sous forme vapeur (en plus du liquide) .

Une seule lettre *H* signifie que le milieu poreux est saturé (une seule variable de pression  $p$ ), par exemple soit de gaz, soit de liquide, soit d'un mélange liquide/gaz (dont la pression du gaz est constante).

Deux lettres *H* signifient que le milieu poreux est non saturé (deux variables de pression  $p$ ), par exemple un mélange liquide/vapeur/gaz.

La présence des deux lettres *HV* signifie que le milieu poreux est saturé par un composant (en pratique de l'eau), mais que ce composant peut être sous forme liquide ou vapeur. Il n'y a alors qu'une équation de conservation de ce composant, donc un seul degré de liberté pression, mais il y a un flux liquide et un flux vapeur. Les relations possibles sont alors les suivantes :

```
/ 'KIT_HM'  
/ 'KIT_THM'  
/ 'KIT_HHM'  
/ 'KIT_THH'  
/ 'KIT_THV'  
/ 'KIT_THHM'  
/ 'KIT_HH'
```

Le tableau ci-dessous résume à quel kit correspond chaque modélisation :

KIT_HM	D_PLAN_HM, D_PLAN_HMD, D_PLAN_HMS, D_PLAN_HM_SI, AXIS_HM, AXIS_HMD, AXIS_HMS, 3D_HM, 3D_HMD, 3D_HMS, 3D_HM_SI
KIT_THM	D_PLAN_THM, D_PLAN_THMD, D_PLAN_THMS, AXIS_THM, AXIS_THMD, AXIS_THMS, 3D_THM, 3D_THMD, 3D_THMS
KIT_HHM	D_PLAN_HHM, D_PLAN_HHMD, D_PLAN_HHMS, AXIS_HHM, AXIS_HHMD, AXIS_HHMS, 3D_HHM, 3D_HHMD, 3D_HHMS, D_PLAN_HH2MD, AXIS_HH2MD, 3D_HH2MD, D_PLAN_HH2MS, AXIS_HH2MS, 3D_HH2MS
KIT_THH	D_PLAN_THHD, D_PLAN_THHS, AXIS_THHD, AXIS_THHS, 3D_THHD, 3D_THHS, D_PLAN_THH2D, AXIS_THH2D, 3D_THH2D, D_PLAN_THH2S, AXIS_THH2S, 3D_THH2S
KIT_THV	D_PLAN_THVD, AXIS_THVD, 3D_THVD
KIT_THHM	D_PLAN_THHMD, D_PLAN_THHMS, AXIS_THHMD, AXIS_THHMS, 3D_THHM, 3D_THHMD, 3D_THHMS, D_PLAN_THH2MD, AXIS_THH2MD, 3D_THH2MD, D_PLAN_THH2MS, AXIS_THH2MS, 3D_THH2MS
KIT_HH	D_PLAN_HHD, AXIS_HHD, 3D_HHD, D_PLAN_HH2D, AXIS_HH2D, 3D_HH2D, D_PLAN_HHS, AXIS_HHS, 3D_HHS, D_PLAN_HH2S, AXIS_HH2S, 3D_HH2S

Pour chaque phénomène modélisé (hydraulique et/ou mécanique), on doit préciser dans RELATION\_KIT :

- Le modèle de comportement mécanique du squelette s'il y a modélisation mécanique (M),
  - / 'ELAS'
  - / 'CJS'
  - / 'HUJEUX'
  - / 'CAM\_CLAY'

```
/ 'BARCELONE'  
/  
/ 'LAIGLE'  
/  
/ 'LETK'  
/  
/ 'DRUCK_PRAGER'  
/  
/ 'DRUCK_PRAG_N_A'  
/  
/ 'VISC_DRUCK_PRAG'  
/  
/ 'ELAS_GONF'  
/  
/ 'HOEK_BROWN_TOT'  
/  
/ 'HOEK_BROWN_EFF'  
/  
/ 'MAZARS'  
/  
/ 'ENDO_ISOT_BETON'
```

- Le comportement des liquides/gaz ,(le même que celui indiqué dans COMP\_THM sous DEFI\_MATERIAU, cf. [§2.2.2])

```
/ 'LIQU_SATU'  
/  
/ 'LIQU_GAZ'  
/  
/ 'GAZ '  
/  
/ 'LIQU_GAZ_ATM'  
/  
/ 'LIQU_VAPE_GAZ '  
/  
/ 'LIQU_AD_GAZ_VAPE '  
/  
/ 'LIQU_AD_GAZ '  
/  
/ 'LIQU_VAPE '
```

- Concernant le comportement hydraulique, l'utilisateur dispose actuellement de 4 choix :

```
/ 'HYDR_UTIL'  
/  
/ 'HYDR_ENDO'  
/  
/ 'HYDR_VGM'  
/  
/ 'HYDR_VGC'
```

- Soit il choisit HYDR\_UTIL : ce mot clé permet alors de renseigner la courbe de saturation et sa dérivée en fonction de la pression capillaire ainsi que la perméabilité relative et sa dérivée en fonction de la saturation. L'utilisateur rentre ces courbes via une série de formules ensuite appelée par DEFI\_MATERIAU (cf 15).
- Soit il choisit HYDR\_ENDO : c'est la même chose mais permet l'utilisation des lois avec endommagement 'MAZARS' et 'ENDO\_ISOT\_BETON' (la perméabilité est alors couplée à l'endommagement).
- Soit il choisit HYDR\_VGM ou HYDR\_VGC ce qui signifie que les lois de capillarité et perméabilités obéiront au modèle de Mualem-Van-Genuchten prédéfini dans le code, autrement dit, la capillarité est donnée par une loi de Van Genuchten :

$$S_{we} = \frac{S - S_{wr}}{1 - S_{wr}} \text{ et } m = 1 - \frac{1}{n}$$

$$S_{wr} = \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{P_c}{P_r} \right)^n \right]^{1/n}}$$

La perméabilité relative à l'eau s'exprime alors en intégrant le modèle de prédiction proposé par Mualem (1976) dans le modèle de capillarité de Van-Genuchten :

$$k_r^w = \sqrt{S_{we}} \left( 1 - \left( 1 - S_{we}^{1/m} \right)^m \right)^2$$

La perméabilité au gaz est formulée de façon similaire par une loi de Parker pour HYDR\_VGM :

$$k_r^{gz} = \sqrt{(1 - S_{we})} (1 - S_{we}^{1/m})^{2m}$$

ou par une loi cubique pour HYDR\_VGC :

$$k_r^{gz} = (1 - S)^3$$

avec dans tous les cas les paramètres  $n$ ,  $Pr$ ,  $Swr$ ,  $Smax$  définis dans DEFI\_MATERIAU :

$n$  correspond au paramètre VG\_N

$Pr$  correspond au paramètre VG\_PR

$Swr$  correspond au paramètre VG\_SR

A cela doivent être rajoutés deux paramètres supplémentaires correspondant à un traitement que l'on effectue sur ces courbes :

$Smax$  qui correspond au paramètre VG\_SMAX

$CSAT$  qui correspond au paramètre VG\_SATUR

Nous allons maintenant expliciter ce qu'est ce traitement et ce que sont  $CSAT$  et  $Smax$ . Pour  $S > Smax$ , ces courbes sont interpolées par un polynôme de degré 2,  $CI$  en  $Smax$ , de manière à éviter d'avoir à traiter des dérivées de valeurs infinies. En effet, pour  $S = 1$  :

$$\frac{\partial k_r^w(S)}{\partial S} = \infty$$

et dans le cas de HYDR\_VGM :

$$\frac{\partial k_r^{gz}(S)}{\partial S} = \infty$$

Pour éviter d'avoir à traiter ce problème (qui n'a a priori pas de signification physique) on remplace ces fonctions à partir d'une saturation  $Smax$  par un polynôme du second ordre  $CI$  en ce point.

Ce qui donne pour la fonction  $k_r^w(S)$  :

Pour  $S = Smax$ , on détermine le polynôme  $PL(S)$  tel que

$$\begin{cases} PL(S_{max}) = k_r^w(S_{max}) \\ PL'(S_{max}) = \frac{\partial k_r^w}{\partial S}(S_{max}) \end{cases} \text{ et } PL(1) = 0$$

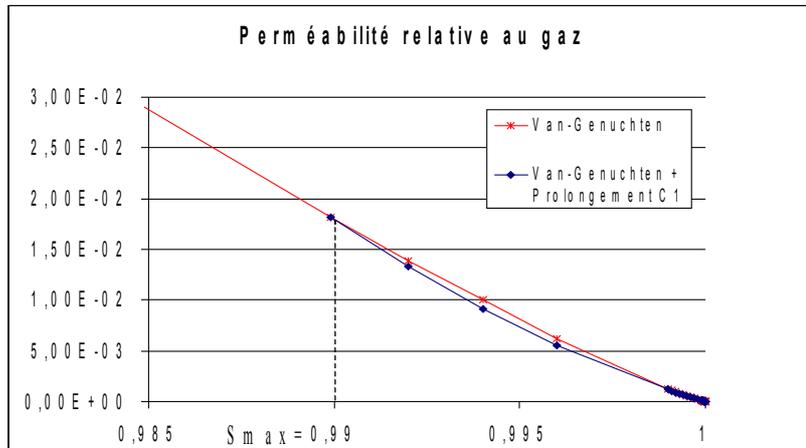
Pour  $S > Smax$ ,  $k_r^w(S)$  est remplacé par  $PL(S)$ .

Et, dans le cas de HYDR\_VGM, pour  $k_r^{gz}(S)$  :

Pour  $S = Smax$ , on détermine le polynôme  $PG(S)$  tel que

$$\begin{cases} PG(S_{max}) = k_r^{gz}(S_{max}) \\ PG'(S_{max}) = \frac{\partial k_r^{gz}}{\partial S}(S_{max}) \end{cases} \text{ et } PG(0) = 1$$

Pour  $S > Smax$ ,  $k_r^{gz}(S)$  est remplacé par  $PG(S)$  comme l'exemple Figure 2.5.3-a. Dans le cas d'une loi cubique, aucun traitement spécial n'est nécessaire.



**Figure 2.5.3-a: Exemple de prolongement d'une perméabilité relative**

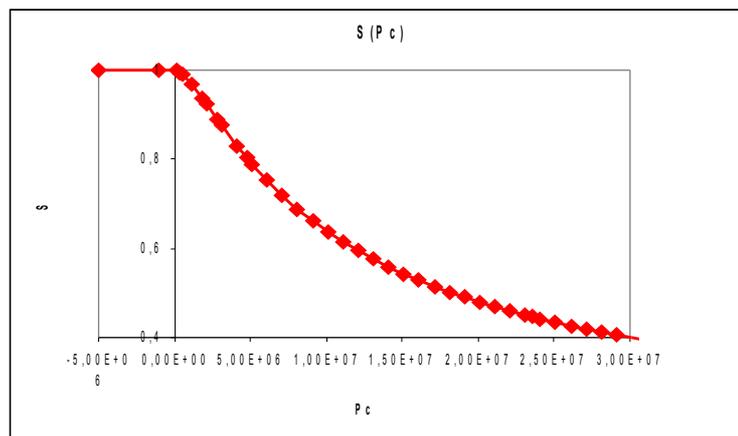
Pour la succion  $S(P_c)$  et pour  $P_c < P_{cmin}$  (avec  $S(P_{cmin}) = S_{max}$ ) on prolonge la courbe  $S(P_c)$  par une hyperbole telle que la courbe soit  $CI$  en ce point :

Pour  $S > S_{max}$  :

$$S(P_c) = 1 - \frac{A}{B - P_c}$$

Avec  $A$  et  $B$  tels que la courbe soit  $CI$  en  $S_{max}$ .

On a donc bien une courbe décroissante qui tend vers 1 quand  $P_c$  tend vers  $-\infty$ . Ce traitement nous permet de gérer des pressions capillaires négatives dans Code\_Aster (voir l'exemple Figure 2.5.3-b).



**Figure 2.5.3-b: Exemple de prolongement pour  $PC < 0$**

$S(P_c)$  est ensuite multipliée par un coefficient « de sécurité »  $CSAT$  de manière à ce que la saturation n'atteigne jamais 1 (problème que l'on ne sait pas traiter).

**Conseil :** on conseille une valeur de  $CSAT$  le plus proche possible de 1 ( 0,99999 par exemple).

**Attention :**

Selon le  $KIT\_XXXX$  choisi, tous les comportements ne sont pas licites (par exemple si on choisit un milieu poreux non saturé, on ne peut pas affecter un comportement de type gaz parfait). toutes les combinaisons possibles sont résumées ci-dessous

	Mécanique	Couplage hydraulique	Loi hydraulique
KIT_HM KIT_THM	'ELAS', 'CJS', 'HUJEUX' 'LAIGLE', 'CAM_CLAY', 'DRUCK_PRAGER', 'LEK', , 'DRUCK_PRAG_N_A', 'VISC_DRUCK_PRAG', 'ELAS_GONF', 'HOEK_BROWN_TOT', 'HOEK_BROWN_EFF',	'GAZ', 'LIQU_SATU', 'LIQU_GAZ_ATM'	'HYDR_UTIL'
KIT_HM KIT_THM	'MAZARS', 'ENDO_ISOT_BETON',	'GAZ', 'LIQU_SATU', 'LIQU_GAZ_ATM'	'HYDR_ENDO'
KIT_HHM KIT_THHM	'ELAS', 'CJS', 'HUJEUX' 'LAIGLE', 'CAM_CLAY', 'DRUCK_PRAGER', 'DRUC K_PRAG_N_A', 'VISC_DRUCK_PRAG', 'ELAS_GONF', 'LEK', 'HOEK_BROWN_TOT', 'HOEK_BROWN_EFF', 'BARCELONE'	'LIQU_GAZ', 'LIQU_VAPE_ GAZ', 'LIQU_AD_VAPE_GAZ' 'LIQU_AD_GAZ'	'HYDR_UTIL' 'HYDR_VGM' 'HYDR_VGC'
KIT_HHM KIT_THHM	'MAZARS', 'ENDO_ISOT_BETON',	'LIQU_GAZ', 'LIQU_VAPE_ GAZ', 'LIQU_AD_VAPE_GAZ' 'LIQU_AD_GAZ'	'HYDR_ENDO'
KIT_THH KIT_HH		'LIQU_GAZ', 'LIQU_VAPE_ GAZ', 'LIQU_AD_VAPE_GAZ' 'LIQU_AD_GAZ'	'HYDR_UTIL' 'HYDR_VGM' 'HYDR_VGC'
KIT_THV		'LIQU_VAPE'	'HYDR_UTIL'

**Remarque :**

*En cas de problème de convergence, il peut être très utile d'activer la recherche linéaire. La recherche linéaire n'améliore cependant pas systématiquement la convergence, elle est donc à manier avec précaution.*

## 2.6 Le post-traitement

### 2.6.1 Généralités

Le post-traitement des données en THM ne varie pas du post-traitement Aster habituel. On rappelle juste que pour toute impression des valeurs aux nœuds qui ne sont pas les inconnues nodales, il est nécessaire de calculer ces valeurs par la commande `CALC_CHAMP` dont on donne un exemple ci-après.

Pour les contraintes :

```
U0=CALC_CHAMP(reuse =U0,
               MODELE=MODELE,
               CHAM_MATER=CHMAT0,
               TOUT_ORDRE='OUI',
               CONTRAINTE=('SIGM_ELNO'),
               RESULTAT=U0,);
```

Pour les variables internes :

```
U0=CALC_CHAMP(reuse =U0,
               MODELE=MODELE,
               CHAM_MATER=CHMAT0,
               TOUT_ORDRE='OUI',
               VARI_INTERNE=('VARI_ELNO'),
```

```
RESULTAT=U0, );
```

Il faut toutefois rappeler que toutes les valeurs de déplacements en sorties correspondent à  $u^{ddl}$  et non  $u = u^{ddl} + u^{ref}$ .

Il est également important de connaître le nom des contraintes et les numéros des variables internes. Tout cela est consigné dans l'annexe I.

Ainsi l'exemple suivant permet d'imprimer la masse d'eau liquide sur le groupe de nœuds *HAUT* à tous les instants.

```
TAB1=POST_RELEVE_T(ACTION=_F( INTITULE='CONT',
                              GROUP_NO=('HAUT'),
                              RESULTAT=U0,
                              NOM_CHAM='SIEF_ELNO',
                              TOUT_ORDRE='OUI',
                              NOM_CMP=('M11'),
                              OPERATION='EXTRACTION', ), );

IMPR_TABLE(TABLE=TAB1,
           FICHER='RESULTAT',
           FORMAT='AGRAF',
           PAGINATION='INST',
           NOM_PARA=('INST', 'COORD_X', 'M11'), );
```

L'exemple suivant permet d'imprimer les valeurs de porosité au nœud 1 et au premier instant.

```
TAB2=POST_RELEVE_T(ACTION=_F( INTITULE='DEPL',
                              NOEUD='NO1',
                              RESULTAT=U0,
                              NOM_CHAM='VARI_ELNO',
                              NUME_ORDRE=1,
                              NOM_CMP=('V2'),
                              OPERATION='EXTRACTION', ), );

IMPR_TABLE(TABLE=TAB2,
           FICHER='RESULTAT',
           FORMAT='AGRAF',
           PAGINATION='INST',
           NOM_PARA=('INST', 'COORD_X', 'V2'), );
```

## 2.6.2 Variables internes

Outre les généralités proposées ci-dessus, il existe désormais un moyen plus convivial d'extraire les variables internes (cf doc U4.81.01). Pour cela des champs ont été créés dont le principe est d'extraire du champ *VARI\_ELGA* (ou *VARI\_ELNO* pour les champs calculés aux nœuds) la variable interne qui nous intéresse via un mot clé plus parlant que *V1*, *V2*, ...

En tant que post-traitement ces champs sont calculés par *CALC\_CHAMP*. La syntaxe à utiliser est la suivante :

- pour un champ aux éléments *cham\_elem*

```
GAMP=CALC_CHAMP(RESULTAT=U0,
                OPTION='VAEX_ELNO',
                NOM_VARI='GAMP');
```

- pour un champ aux nœuds *cham\_no* :

```
GAMP=CALC_CHAMP(reuse=GAMP,  
RESULTAT=GAMP,  
VARI_INTERNE='VAEX_NOEU');
```

Puisqu'il s'agit juste d'extraire une (et une seule!!) variable interne, les `cham_elem` correspondants doivent avoir été calculés au préalable :

```
U0=CALC_CHAMP(reuse=U0,  
MODELE=MODELE,  
CHAM_MATER=CHMAT0,  
TOUT_ORDRE='OUI',  
VARI_INTERNE=('VARI_ELNO'),  
RESULTAT=U0,);
```

La liste des différents noms symboliques des variables internes est :

"DPORO"	variation de la porosité du matériau
"DRHOLQ"	variation de la masse volumique du matériau
"DPVP"	variation de la pression de vapeur
"SATLIQ"	saturation du liquide
"EVP"	déformation plastique volumique cumulée
"IND_ETA"	Indicateur d'état mécanique
"D"	Valeur de l'endommagement
"IND_END"	Indicateur d'endommagement
"TEMP_MAX"	Température maximale
"GAMP"	Déformation déviatoire plastique cumulée
"PCR"	Pression critique
"SEUIL_HYD"	Seuil hydrique
"IND_HYD"	Indicateur d'irréversibilité hydrique
"PCOHE"	Pression de cohésion
"COMP_ROC"	Comportement de la roche
"SEUIL_ISO"	Seuil isotrope
"ANG_DEV"	Angle du seuil déviatoire
"X11"	Composantes du tenseur d'écroissage cinématique
"X22"	Composantes du tenseur d'écroissage cinématique
"X33"	Composantes du tenseur d'écroissage cinématique
"X12"	Composantes du tenseur d'écroissage cinématique
"X13"	Composantes du tenseur d'écroissage cinématique
"X23"	Composantes du tenseur d'écroissage cinématique
"DIST_DEV"	Distance normalisée au seuil déviatoire
"DEV_SUR_CRIT"	Rapport entre le seuil déviatoire et le seuil déviatoire critique
"DIST_ISO"	Distance normalisée au seuil isotrope
"NB_ITER"	Nombre d'itérations internes
"ARRET"	Valeur du test local d'arrêt du processus itératif
"NB_REDE"	Nombre de redécoupage local du pas de temps
"SIGNE"	Signe du produit contracté de la contrainte déviatoire par la déformation plastique déviatoire

## Remarque :

Lorsque la variable à extraire ne fait pas partie des variables internes des lois concernées, une alarme est émise mais le champ est tout de même affecté à `R8VIDE()`.

## 2.6.3 Isovaleurs

Attention : distinction résolution linéaire et maillage quadratique

On rappelle que pour tout problème THM et afin d'éviter toute ambiguïté pour l'utilisateur, le maillage utilisé est toujours quadratique. En revanche la résolution du problème hydraulique et thermique est

linéaire : les inconnues *PRE1* , *PRE2* et *TEMP* n'existent donc que sur les nœuds sommets du maillage.

A l'issue du calcul, on obtient un résultat sous cette forme:

- Les pressions *PRE1* , *PRE2* et les températures *TEMP* sont sur les nœuds sommets des éléments.
- Les variables internes, les contraintes sont sur les points de gauss et/ou les nœuds du maillage quadratique (suivant que l'on soit en sélectif ou en lumpé) et les déplacements mécaniques sont sur les sommets et les nœuds milieux.

Il y a donc un conflit entre les maillages quadratiques et les calculs linéaires ce qui va poser un problème par exemple pour tracer des isovaleurs.

Il existe alors une manière simple de s'affranchir de ce problème en projetant l'ensemble des résultats sur le maillage linéaire issu du maillage quadratique. Ainsi tous les résultats seront définis au même endroit (sur les sommets).

Pour *TEMP* , *PRE1* et *PRE2* , il suffit de projeter comme sur l'exemple suivant :

### ## projection du maillage quadratique sur le maillage linéaire :

```
MAILQ4 = CREA_MAILLAGE (
                                MAILLAGE = MAIL,
                                QUAD_LINE = _F(TOUT = 'OUI'),
                                )
```

### ## affectation du modèle correspondant :

```
MODELQ4=AFPE_MODELE (MAILLAGE=MAILQ4,
                    AFPE=_F (TOUT='OUI',
                            PHENOMENE='MECANIQUE',
                            MODELISATION='D_PLAN',),),);
```

### ## projection du résultat sur ce nouveau modèle :

```
RESULIN = PROJ_CHAMP (
                    METHODE='ELEM',
                    RESULTAT=resu,
                    MODELE_1=MODELQ8,
                    MODELE_2=MODELQ4,
                    NOM_CHAM = 'DEPL',
                    TOUT_ORDRE='OUI')
```

### ## post-traitement habituel mais sur le maillage linéaire :

```
IMPR_RESU (FORMAT='MED',
           RESU=_F (
                   RESULTAT=RESULIN,
                   NUME_ORDRE=(1,10,20),,
                   NOM_CMP    = ('PRE1','PRE2',),,
                   MAILLAGE=MAILQ4,),),);
```

Il existe une méthode alternative, qui peut s'avérer plus rapide pour les grosses études industrielles. Cette méthode utilise *MACR\_ADAP\_MAIL*. On suppose que *resu* est composé de *nbinst* instants stockés dans la liste *linst*. Le post-traitement précédent peut également se faire de la manière suivante :

```
PRE = [None]*nbinst;
```

```

PREB = [None]*nbinst;

for k in range(nbinst) :

    PRE[k]=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='NOEU_DEPL_R',
                      OPERATION='EXTR',
                      RESULTAT=resu,
                      NOM_CHAM='DEPL',
                      INST=lnst[k],);

motcle1={}
motcle2={}

motcle1['MAJ_CHAM']=[]
motcle2['AFFE']=[]

for k in range(nbinst) :

    PREB[k] =CO('PREB_%d' % (k))

    motcle1['MAJ_CHAM'].append(
        _F(TYPE_CHAM='NOEU_DEPL_R',CHAM_GD = PRE[k],
           CHAM_MAJ = PREB[k],),);

    motcle2['AFFE'].append(
        _F(CHAM_GD=PREB[k],INST=lnst[k],),);

MACR_ADAP_MAIL( ADAPTATION='MODIFICATION',DEGRE='OUI',
                 MAILLAGE_N = MAILQ8,
                 MAILLAGE_NP1 = CO('MAILQ4'),
                 **motcle1);

RESULINB=CREA_RESU(OPERATION='AFFE',TYPE_RESU='EVOL_NOLI',NOM_CHAM='DEPL',*
**motcle2);

```

## 2.7 Quelques cas tests

A titre informatif, on récapitule ici quelques cas tests disponibles dans la base de Code\_Aster. Cette liste n'est absolument pas exhaustive mais permet d'accéder directement à un certain nombre d'exemples représentatifs.

Nom de cas-test	Type de modélisation THM	Phénomène représenté	Modélisation géométrique	Loi de couplage
Wtna109a	AXIS_THVD	Désaturation par chauffage d'un milieu sans air	axisymétrique	LIQU_VAPE
Wtna110a	AXIS_HH2MS	Modélisation d'un gonflement d'une argile	axisymétrique	LIQU_AD_GAZ_VAPE
Wtna107	AXIS_THMS	Chauffage d'un milieu saturé (THM)	axisymétrique	LIQU_SATU
Wtnp117a	D_PLAN_HHS	Rééquilibrage capillaire de 2 matériaux (BO/BG)	plane	LIQU_GAZ
Wtnp118a	D_PLAN_HH2D	Rééquilibrage gravitaire d'une colonne	plane	LIQU_AD_GAZ_VAPE
Wtnp112a	D_PLAN_HHD	Resaturation d'une colonne (hypothèse de Richards)	plane	LIQU_GAZ_ATM
Wtnp101a	D_PLAN_HM	Modélisation d'un	plane	GAZ

		milieu saturé en gaz		
Wtnl100a	D_PLAN_HMD D_PLAN_HM_SI	Problème de consolidation (Therzagi)	plane	LIQU_SATU
Wtnv123a	3D_HHM	Essai hydrostatique puis triaxial à succion fixe (modèle de Barcelone)	3D	LIQU_GAZ
Wtnp113a	D_PLAN_THHD	Resaturation d'une alvéole par le massif	plane	LIQU_GAZ
Wtnv121a	3D_HHMD	Mouillage du béton avec endommagement	3D	LIQU_GAZ
Wtnv130a	3D_THH2S	Chauffage d'un milieu poreux avec air dissous	3D	LIQU_AD_GAZ_VAPE

## 3 Les modélisations THM par une approche second gradient

Les modélisations de type second gradient et second gradient de dilatation sont décrites dans la documentation [R5.04.03] dans le cadre des milieux poreux. Leur utilisation est indispensable lorsque les lois de comportements mécaniques modélisent une dégradation du matériau – on parle de lois adoucissantes. En effet, dans ce cas, les solutions dépendent du maillage y compris lorsque le milieu est couplé avec les équations de l'hydraulique.

L'intégration numérique de ces modèles a suivi un protocole atypique lors de sa mise en œuvre pour faciliter son utilisation dans Code\_Aster. Ainsi, la partie régularisante (second gradient) est définie comme un patch qu'il suffit de « coller » sur la structure à modéliser. On décrit ci-dessous les étapes à suivre pour produire une telle simulation.

- 1) Définition du patch
- 2) Choix du modèle
- 3) Définition du matériau
- 4) Conditions aux limites
- 5) Calcul

### 3.1 Définition du patch

Pour la simulation d'une étude THM par une approche de type second gradient, il faut définir un maillage quadratique pour la discrétisation de la structure, puis un second maillage pour le patch régularisant. La particularité de ce second maillage est qu'il doit nécessairement être topologiquement identique au premier maillage (mêmes nœuds et mêmes éléments géométriques). Pour des raisons de simplification numérique et pour des raisons de cohérence de modèles, on conseille d'utiliser la procédure suivante :

- 1) Définition d'une discrétisation spatiale pour la structure et la modélisation THM ;
- 2) Duplication du maillage précédent sur l'ensemble de la structure par la commande `CREA_MAILLAGE` pour définir le patch
- 3) Modification éventuelle du type de mailles pour une étude avec multiplicateurs de Lagrange aux centres des éléments.

#### 3.1.1 Étape 1. Définition du maillage de la structure

Cette première étape est à produire par un mailleur pour discrétiser la structure. On récupère ensuite le maillage par la commande `Code_Aster` :

lecture du maillage (quadratique)

```
MA = LIRE_MAILLAGE ( )
```

## 3.1.2 Étape 2. Duplication du maillage pour définir le patch

Il existe dans *Code\_Aster* une procédure qui permet de dupliquer un maillage en conservant les mêmes nœuds que le maillage original – il est indispensable que les nœuds du premier maillage soient inclus dans le patch (cf [R5.04.03]). Il est nécessaire de définir ce second maillage pour permettre de définir la modélisation second gradient au patch régularisant.

Duplication du maillage (quadratique). Seules les mailles sont dupliquées, les nœuds restent communs. Le but est d'associer à chacun de ces maillages une modélisation différente.

```
MAIL=CREA_MAILLAGE(MAILLAGE = MA,  
                   CREA_GROUP_MA = ( _F( NOM = 'ROCHE_REG',  
                                         GROUP_MA = 'ROCHE' ) ) )
```

## 3.1.3 Étape 3. Modification (éventuelle) du maillage du patch

Il existe différentes discrétisations éléments finis pour interpoler les modélisations second gradient (avec ou sans multiplicateurs de Lagrange, multiplicateurs de Lagrange au centre des éléments ou aux nœuds sommets). Par conséquent il faut adapter le maillage du patch à l'espace de discrétisation de la modélisation second gradient.

Par exemple pour prendre en compte une interpolation avec des multiplicateurs de Lagrange aux centres des éléments, il faut définir les nœuds aux centres des éléments car ceux-ci ne sont pas prévus, en général, dans les discrétisations spatiales proposées par la plupart des mailleurs. Ainsi dans ce cas, on peut utiliser la commande *Code\_Aster* suivante :

Introduction de nœuds centraux aux éléments finis du nouveau maillage pour une interpolation  $P2-P1-P0$ . Procédure nécessaire pour prendre en compte les interpolations des multiplicateurs de Lagrange.

```
MAILLAGE=CREA_MAILLAGE(MAILLAGE = MAIL,  
                       MODI_MAILLE = ( _F( GROUP_MA = 'ROCHE_REG',  
                                           OPTION = 'QUAD8_9' ),  
                                         _F( GROUP_MA = 'ROCHE_REG',  
                                           OPTION = 'TRIA6_7' ) ) )
```

Cette étape n'est possible qu'en 2D lorsque l'interpolation élément fini considère des multiplicateurs de Lagrange constant par élément.

## 3.2 Choix du modèle

Les « patches régularisants » second gradient ou second gradient de dilatation sont à combiner avec n'importe quel type de modélisation THM. Ils n'ont d'intérêt, bien entendu, qu'en présence d'une composante mécanique (adoucissante). Les modélisations disponibles sont :

Modélisation	Modélisation géométrique	Phénomène pris en compte
D_PLAN_2DG	Plane	Second gradient
D_PLAN_DIL	Plane	Second gradient de dilatation
3D_DIL	3D	Second gradient de dilatation

### Remarque :

*A noter qu'il est fortement conseillé d'utiliser les modélisations second gradient de dilatation pour traiter les comportements des sols et des roches ou plus particulièrement tout type de matériau présentant une variation volumique lors de sa dégradation .*

Les inconnues nodales des modélisations THM sont alors enrichies après ajout du « patch » second gradient. Le nombre d'inconnues varie selon le patch considéré et le type de mailles caractérisant la discrétisation spatiale du patch. Pour la modélisation second gradient de dilatation c'est donc par le choix de la topologie de la maille que l'interpolation des multiplicateurs de Lagrange sera déterminée (voir le tableau ci-dessous). On résume dans le tableau ci-dessous les différentes possibilités où l'on note en accord avec [R5.04.03],  $f_{ij}$  les

composantes du tenseur des déformations microscopiques,  $\chi$  la déformation volumique microscopique et  $\lambda$  le multiplicateur de Lagrange:

Modélisation	Type de mailles	Degrés de liberté	Position du degré de liberté
D_PLAN_2DG	TRIA7, QUAD9	$f_{ij}$	Aux sommets de chaque élément
		$\lambda_{ij}$	Au centre de chaque élément
D_PLAN_DIL	TRIA7, QUAD9	$\chi$	Aux sommets de chaque élément
		$\lambda$	Au centre de chaque élément
	TRIA6, QUAD8	$\chi$	Aux sommets de chaque élément
3D_DIL	TETRA10, HEXA20, PENTA15	$\chi, \lambda$	Aux sommets de chaque élément

On procède alors de la façon suivante :

```
MODELE = AFFE_MODELE( MAILLAGE = MAILLAGE,  
                      AFFE      = ( _F( GROUP_MA      = 'ROCHE',  
                                      PHENOMENE      = 'MECANIQUE',  
                                      MODELISATION    = 'D_PLAN_HMS' ),  
                      _F( GROUP_MA      = 'ROCHE_REG',  
                                      PHENOMENE      = 'MECANIQUE',  
                                      MODELISATION    = 'D_PLAN_DIL' ) ) )
```

### 3.3 Définition du matériau

Il faut, en plus de la définition des paramètres matériaux nécessaires pour le calcul THM décrit au chapitre précédent, ajouter un paramètre qui caractérise la longueur caractéristique de la modélisation second gradient (cf [R5.04.03]). Cette donnée caractérise en fait la dimension du voisinage qui contribue à la description d'un point matériel.

Cette longueur est définie à partir des composantes matériau  $A1$  et  $A3$  de la loi de comportement d'élasticité linéaire second gradient inspirée des travaux de Mindlin dans le cas de la modélisation second gradient de dilatation. C'est dans la détermination de ces paramètres que réside la plus grande difficulté. Il n'existe pas aujourd'hui de méthode analytique pour les identifier. La pratique est de faire quelques essais préalable. Dans le cas des modélisations second gradient cette longueur est fonction des 5 composantes  $A1$ ,  $A2$ ,  $A3$ ,  $A4$  et  $A5$ , à renseigner sous le mot-clé ELAS\_2NDG de DEFI\_MATERIAU (cf [R5.04.03]).

On peut, de plus, ajouter un paramètre numérique de pénalisation. Il a été montré que le terme de pénalisation des modélisations second gradient de dilatation améliore la convergence numérique sans perturber la qualité des résultats.

Voici un exemple de définition des paramètres matériau pour la partie second gradient.

```
SOL2 = DEFI_MATERIAU( ELAS_2NDG = _F( A1 = 4.0E4,  
                                       A2 = 0.0,  
                                       A3 = 0.0,  
                                       A4 = 0.0,  
                                       A5 = 0.0, ),  
                      NON_LOCAL = _F( PENA_LAGR=1.0E12, ), );
```

Puis affectation des paramètres matériaux suivant la même procédure que pour la définition des modélisations.

```
MATE = AFFE_MATERIAU( MAILLAGE = MAILLAGE,  
                      AFFE      = ( _F( TOUT      = 'ROCHE',  
                                       MATER      = SOL_HM, ),  
                      _F( GROUP_MA = 'ROCHE_REG',  
                                       MATER      = SOL2 ) ) )
```

## 3.4 Impact sur les conditions aux limites

Il n'y a aucun impact à apporter dans le fichier de commande Code\_Aster pour prendre en compte les conditions aux limites avec les modélisations second gradient par rapport aux modélisations classiques THM. En revanche, il est essentiel de noter que la signification physique des conditions aux limites de pression de contraintes normales est modifiée avec les modélisations second gradient (cf [R5.04.03]).

## 3.5 Résolution du problème

Le calcul est à effectuer par la commande `STAT_NON_LINE`. Il suffit d'ajouter au calcul classique THM la relation de comportement d'élasticité second gradient sur le maillage correspond au patch comme sur l'exemple ci-dessous (mot-clé `ELAS`). Il n'y a aucune incompatibilité avec les lois de comportement. A noter, tout de même, qu'une simulation THM par une approche second gradient n'a d'intérêt qu'en présence d'une composante mécanique dans le calcul couplé.

Il est important de noter que lorsque la modélisation prend en compte une interpolation des multiplicateurs de Lagrange constants par éléments il est nécessaire d'utiliser le solveur Mumps pour la résolution.

Définition du calcul statique non linéaire avec une loi de comportement associé à chacune des modélisation : comportement de type Drucker-Prager pour le premier gradient, et élasticité linéaire pour le second gradient

```
U1 = STAT_NON_LINE( MODELE      = MODELE,
                    CHAM_MATER = MATE,
                    EXCIT      = ( _F( CHARGE = CHCI ), ... ),
                    SOLVEUR    = ( _F( METHODE='MUMPS', ) ),
                    COMP_INCR  = ( _F( GROUP_MA='ROCHE',
                                      RELATION = 'DRUCK_PRAGER', ),
                                  _F( GROUP_MA = 'ROCHE_REG',
                                      RELATION = 'ELAS', ), ),
                    NEWTON     = _F( MATRICE = 'TANGENTE', REAC_ITER = 1 ),
                    INCREMENT = _F( LIST_INST = TEMPS ) )
```

On trouvera un exemple de modélisation par second gradient, par exemple dans le cas test `ss11117`.

## Annexe 1 Contraintes généralisées et variables internes

Les contraintes :

Numéro	Nom de composante Aster	Contenu	Modélisations
1	SIXX	$\sigma'_{xx}$	Si mécanique (.. M ...)
2	SIYY	$\sigma'_{yy}$	Si mécanique (.. M ...)
3	SIZZ	$\sigma'_{zz}$	Si mécanique (.. M ...)
4	SIXY	$\sigma'_{xy}$	Si mécanique (.. M ...)
5	SIXZ	$\sigma'_{xz}$	Si mécanique (.. M ...)
6	SIYZ	$\sigma'_{yz}$	Si mécanique (.. M ...)
7	SIP	$\sigma_p$	Si mécanique (.. M ...)
8	M11	$m_w$	Dans tous les cas
9	FH11X	$M_{w_x}$	Dans tous les cas
10	FH11Y	$M_{w_y}$	Dans tous les cas
11	FH11Z	$M_{w_z}$	Dans tous les cas
12	ENT11	$h_w^m$	Dans tous les cas avec thermique
13	M12	$m_{vp}$	Si 2 pressions inconnues (.. HH ...)
14	FH12X	$M_{vp_x}$	Si 2 pressions inconnues (.. HH ...)
15	FH12Y	$M_{vp_y}$	Si 2 pressions inconnues (.. HH ...)
16	FH12Z	$M_{vp_z}$	Si 2 pressions inconnues (.. HH ...)
17	ENT12	$h_{vp}^m$	Si 2 pressions inconnues et thermique (.. THH ...)
18	M21	$m_{as}$	Si 2 pressions inconnues (.. HH ...)
19	FH21X	$M_{as_x}$	Si 2 pressions inconnues (.. HH ...)
20	FH21Y	$M_{as_y}$	Si 2 pressions inconnues (.. HH ...)
21	FH21Z	$M_{as_z}$	Si 2 pressions inconnues (.. HH ...)
22	ENT21	$h_{as}^m$	Si 2 pressions inconnues et thermique (.. THH ...)
18	M22	$m_{ad}$	Si modélisation de l'air dissous (...HH2...)
19	FH22X	$M_{ad_x}$	Si modélisation de l'air dissous (...HH2...)
20	FH22Y	$M_{ad_y}$	Si modélisation de l'air dissous (...HH2...)
21	FH22Z	$M_{ad_z}$	Si modélisation de l'air dissous (...HH2...)
22	ENT22	$h_{ad}^m$	Si modélisation de l'air dissous et thermique (...THH2...)
23	QPRIM	$Q'$	Si thermique
24	FHTX	$q_x$	Si thermique
25	FHTY	$q_y$	Si thermique

---

26 FHTZ  $q_z$  Si thermique

Dans le cas sans mécanique, et pour les lois de comportements (LIQU\_VAPE\_GAZ, LIQU\_VAPE, LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE, 'LIQU\_AD\_GAZ') les variables internes sont :

Numéro	Nom de composante Aster	Contenu
1	V1	$\rho_{lq} - \rho_{lq}^0$
2	V2	$\varphi - \varphi^0$
3	V3	$p_{vp} - p_{vp}^0$
4	V4	$S_{lq}$

Dans le cas sans mécanique, et pour les lois de comportements (LIQU\_GAZ, LIQU\_GAZ\_ATM,) les variables internes sont :

Numéro	Nom de composante Aster	Contenu
1	V1	$\rho_{lq} - \rho_{lq}^0$
2	V2	$\varphi - \varphi^0$
3	V3	$S_{lq}$

Dans le cas sans mécanique, et pour les lois de comportements (LIQU\_SATU,) les variables internes sont :

Numéro	Nom de composante Aster	Contenu
1	V1	$\rho_{lq} - \rho_{lq}^0$
2	V2	$\varphi - \varphi^0$

Dans le cas avec mécanique les premiers numéros seront ceux correspondant à la mécanique (V1 dans le cas élastique, V1 et suivantes pour des modèles plastiques). Le numéro des variables internes ci-dessus devra alors être incrémenté d'autant.

## Annexe 2 Éléments supplémentaires sur les conditions aux limites en THM

Dans ce qui suit on ne prend pas en compte l'air dissous (l'indice  $lq$  correspond alors à celui de l'eau  $w$ ) et on s'attache au cas non saturé.

Nous rappelons ici le choix des inconnues de pression.

Comportement	LIQU_GAZ et LIQU_VAPE_GAZ
PRE1	Pression capillaire : $p_c = p_{gz} - p_{lq}$
PRE2	Pression de gaz $p_{gz} = p_{vp} + p_{as}$

### A2.1 Formulation variationnelle des équations de conservation

On se réfère ici à [R7.01.11]. Ces équations sont

$$\dot{m}_{lq} + \dot{m}_{vp} + Div(M_{lq} + M_{vp}) = 0 \quad \text{éq A5.1-1}$$

$$\dot{m}_{as} + Div(M_{as}) = 0 \quad \text{éq A5.1-2}$$

La formulation variationnelle déduite est donnée par

$$-\int_{\Omega} (\dot{m}_{lq} + \dot{m}_{vp}) \pi_1 d\Omega + \int_{\Omega} (M_{lq} + M_{vp}) \cdot \nabla \pi_1 d\Omega = \int_{\partial\Omega} (M_{lq_{ext}} + M_{vp_{ext}}) \cdot \pi_1 d\Gamma \quad \forall \pi_1 \in P_{1_{ad}} \quad \text{éq A5.1-3}$$

$$-\int_{\Omega} \dot{m}_{as} \pi_2 d\Omega + \int_{\Omega} M_{as} \cdot \nabla \pi_2 d\Omega = \int_{\partial\Omega} M_{as_{ext}} \cdot \pi_2 d\Gamma \quad \forall \pi_2 \in P_{2_{ad}} \quad \text{éq A5.1-4}$$

Les pressions capillaires et de gaz sont liées aux pression d'eau, de vapeur et d'air sec par les relations :

$$p_c = p_{gz} - p_{lq} \quad \text{éq A5.1-5}$$

$$p_{gz} = p_{vp} + p_{as} \quad \text{éq A5.1-6}$$

La pression de vapeur n'est pas une variable indépendante. Elle est reliée à la pression de liquide  $p_{lq}$  par les relations

$$\frac{dp_{vp}}{\rho_{vp}} = \frac{dp_{lq}}{\rho_{lq}} + (h_{vp}^m - h_{lq}^m) \frac{dT}{T} \quad \text{éq A5.1-7}$$

$$dh_{lq}^m = C_{lq}^p dT + (1 - 3\alpha_{lq} T) \frac{dp_{lq}}{\rho_{lq}} \quad \text{éq A5.1-8}$$

$$dh_{vp}^m = C_{vp}^p dT \quad \text{éq A5.1-9}$$

Ces relations montrent que la pression de vapeur est déterminée complètement par la connaissance de  $p_{lq}$

(et de son évolution). Souvent, ces relations servent à établir la loi de Kelvin,  $\frac{p_{lq} - p_{lq}^0}{\rho_{lq}} = \frac{R}{M_{vp}^{ol}} T \ln \left( \frac{p_{vp}}{p_{vp}^{sat}(T)} \right)$

, mais cette loi n'est pas utilisée directement dans Aster.

Les documents de référence Aster ne disent rien sur ce que sont les variables  $\pi_1$  et  $\pi_2$ . Mais deux éléments peuvent nous mettre sur la piste :

- D'une part,  $\pi_1 \in P_{1ad}$  et  $\pi_2 \in P_{2ad}$  alors que  $P_{1ad}$  et  $P_{2ad}$  sont les espaces d'appartenance de  $PRE1$  et  $PRE2$  (incluant donc leurs conditions aux limites).
- D'autre part, au chapitre 7. de [R7.01.10], on voit que la déformation virtuelle  $E_g^{*el} = (v, \varepsilon(v), \pi_1, \nabla \pi_1, \pi_2, \nabla \pi_2, \tau, \nabla \tau)$  est liée au vecteur de déplacement nodaux virtuel  $U^{*el} = (v, \pi_1, \pi_2, \tau)$  par le même opérateur  $Q_g^{el}$  que celui qui relie entre eux la déformation  $E_g^{el} = (u, \varepsilon(u), p_1, \nabla p_1, p_2, \nabla p_2, T, \nabla T)$  et le déplacement nodal  $U^{el} = (u, p_1, p_2, T)$  :
  - $E_g^{*el} = Q_g^{el} U^{*el}$
  - $E_g^{el} = Q_g^{el} U^{el}$

Il est alors clair que  $\pi_1$  et  $\pi_2$  sont des variations virtuelles de  $p_1$  et  $p_2$

D'où le tableau :

$$\begin{aligned} p_1 = p_c &\Rightarrow \pi_1 = \delta p_c = p_c^* \\ p_1 = p_{lq} &\Rightarrow \pi_1 = \delta p_{lq} = p_{lq}^* \\ p_2 = p_{gz} &\Rightarrow \pi_2 = \delta p_{gz} = p_{gz}^* \end{aligned}$$

## A2.2 Cas de conditions aux limites faisant intervenir les inconnues principales

Ce que nous disons dans ce paragraphe et les suivants est relatif à une partie de la frontière  $\partial \Omega_d$  sur laquelle des conditions sont prescrites : rien n'empêche bien sûr que ces conditions ne soient pas les mêmes sur des parties de frontières différentes. Nous traitons dans ce chapitre le cas habituel où on impose des conditions sur  $PRE1$  et/ou  $PRE2$ , par opposition au chapitre suivant où nous parlerons de relations linéaires entre inconnues.

$$\begin{aligned} p_c &= p_{gz} - p_{lq} = p_c^{imp} \\ p_{gz} &= p_{as} + p_{vp} = p_g^{imp} \end{aligned}$$

Les flux sont alors des résultats de calculs par [éq A5.1-3] et [éq A5.1-4]

- **Dirichlet  $PRE1$ , Neuman  $PRE2$**

C'est le cas où on impose une valeur à  $PRE1$  et une valeur au flux associé à  $PRE2$ , en ne disant rien sur  $PRE2$  ou en donnant une valeur à `FLUN_HYDR2` de `FLUX_THM_REP` dans `AFFE_CHAR_MECA`. Appelons  $M_{2_{ext}}$  cette quantité imposée, qui vaudra 0 si rien n'est dit relativement à  $PRE2$ . Nous noterons  $p_1 = p_1^{imp}$  la condition imposée sur  $PRE1$

Ceci correspond à :

$$\begin{aligned} p_c &= p_{gz} - p_{lq} = p_c^{imp} \\ p_1^{imp} &= p_c^{imp} \end{aligned}$$

Pour faire la démonstration dans le cadre non homogène, il faudrait introduire un relèvement de la condition  $p_1 = p_1^{imp}$  (c'est à dire un champ particulier vérifiant cette condition). Cela alourdit les écritures et n'apporte rien, on se place donc dans le cadre homogène  $p_1^{imp} = 0$

Dans [éq A5.1-3] et [éq A5.1-4], on peut donc prendre  $\pi_2$  quelconque et  $\pi_1$  vérifiant  $\pi_1=0$  sur  $\partial\Omega_d$ . On commence alors à prendre  $\pi_1=0$  et  $\pi_2=0$  sur tout le bord  $\partial\Omega$  et on obtient [éq A5.1-1] et [éq A5.1-2] au sens des distributions. On multiplie alors [éq A5.1-1] par  $\pi_1$  tel que  $\pi_1=0$  sur  $\partial\Omega_d$  on multiplie [éq A5.1-2] par  $\pi_2$  quelconque, on intègre par partie, on tient compte de [éq A5.1-3] et [éq A5.1-4] et on obtient, en désignant par  $n$  la normale au bord :

$$\int_{\partial\Omega_d} M_{as} \cdot n \cdot \pi_2 d\Gamma = \int_{\partial\Omega_d} M_{2ext} \pi_2 d\Gamma, \quad \forall \pi_2$$

On en déduit

$$M_{as} \cdot n = M_{2ext} \text{ sur } \partial\Omega_d$$

- **Dirichlet PRE2 , Neuman PRE1**

C'est le cas où on impose une valeur à PRE2 et une valeur au flux associé à PRE1, en ne disant rien sur PRE1 ou en donnant une valeur à FLUN\_HYDR1 de FLUX\_THM\_REP dans AFFE\_CHAR\_MECA. Appelons  $M_{1ext}$  cette quantité imposée, qui vaudra 0 si rien n'est dit relativement à PRE2. Nous noterons  $p_2 = p_2^{imp}$  la condition imposée sur PRE2. Ceci correspond à :

$$\begin{aligned} p_{gz} &= p_{as} + p_{vp} = p_{gz}^{imp} \\ p_2^{imp} &= p_{gz}^{imp} \end{aligned}$$

La démonstration est la même qu'au paragraphe précédent et aboutit à :

$$(M_{lq} + M_{vp}) \cdot n = M_{1ext} \text{ sur } \partial\Omega_d$$

## A5.3 Cas de conditions aux limites faisant intervenir des relations linéaires entre inconnues principales

Code\_Aster permet d'introduire comme conditions aux limites des relations entre degrés de liberté, portés par le même nœud ou par des nœuds différents. Cette possibilité est atteinte via le mot clé LIAISON\_DDL de la commande AFFE\_CHAR\_MECA.

Soit  $p_{lq}^{imp}$  la valeur que l'on veut imposer à la pression de liquide sur  $\partial\Omega_d$ . Compte tenu de [éq A5.1-5], et du choix des inconnues principales pour ce comportement, on écrit :

$$p_{gz} - p_c = p_2 - p_1 = p_{lq}^{imp} \quad \text{éq A5.3-1}$$

Les relations linéaires sont traitées dans Aster par introduction de multiplicateurs de Lagrange. Ceci correspond en l'espèce à la formulation suivante :

Trouver  $p_1, p_2, \mu$  tels que :

$$\begin{aligned} & - \int_{\Omega} (\dot{m}_{lq} + \dot{m}_{vp}) \pi_1 d\Omega + \int_{\Omega} (M_{lq} + M_{vp}) \cdot \nabla \pi_1 d\Omega - \int_{\Omega} \dot{m}_{as} \pi_2 d\Omega + \int_{\Omega} M_{as} \cdot \nabla \pi_2 d\Omega + \\ & + \int_{\partial\Omega_d} \mu^* (p_2 - p_1 - p_{lq}^{imp}) d\Gamma + \int_{\partial\Omega_d} \mu (\pi_2 - \pi_1 - p_{lq}^{imp}) d\Gamma \quad \forall \pi_1, \pi_2, \mu^* \end{aligned} \quad \text{éq A5.3-2}$$

Pour faire la démonstration dans le cadre non homogène, il faudrait introduire un relèvement de la condition  $p_2 - p_1 - p_{lq}^{imp} = 0$  (C'est à dire des champs particuliers vérifiant cette condition). Cela alourdit les écritures et n'apporte rien, on se place donc dans le cadre homogène  $p_{lq}^{imp} = 0$ .

On commence alors à prendre  $\pi_1 = 0$  et  $\pi_2 = 0$  sur tout le bord  $\partial \Omega$  et on obtient [éq A5.1-1] et [éq A5.1-2] au sens des distributions. On multiplie alors [éq A5.1-1] par  $\pi_1$  quelconque on multiplie [éq A5.1-2] par  $\pi_2$  quelconque, on intègre par partie, on porte les résultats trouvés dans [éq A5.3-2] et on obtient :

$$\int_{\partial \Omega_d} (M_{lq} + M_{vp}) \cdot n \cdot \pi_1 d\Gamma + \int_{\partial \Omega_d} M_{as} \cdot n \cdot \pi_2 d\Gamma + \int_{\partial \Omega_d} \mu^* (p_2 - p_1) d\Gamma + \int_{\partial \Omega_d} \mu (\pi_2 - \pi_1) d\Gamma = 0 \quad \forall \pi_1, \pi_2, \mu^* \quad \text{éq A5.3-3}$$

Il est clair que [éq A5.3-3] redonne bien  $p_2 - p_1 = p_{lq}^{imp} = 0$

En prenant de plus  $\pi_2 - \pi_1 = 0$ , on trouve :

$$\int_{\partial \Omega_d} (M_{lq} + M_{vp} + M_{as}) \cdot n \cdot \pi_1 d\Gamma = 0 \quad \forall \Gamma_1$$

D'où l'on déduit :

$$(M_{lq} + M_{vp} + M_{as}) \cdot n = 0 \text{ sur } \partial \Omega_d \quad \text{éq A5.3-4}$$

## A5.4 Les cas non linéaires

Nous ne faisons ici qu'aborder des questions plus difficiles consistant à imposer soit la pression de vapeur soit la pression d'air sec. Compte tenu des relations [éq A5.1-7], [éq A5.1-8] et [éq A5.1-9] imposer une valeur sur la pression de vapeur revient à imposer une relation non linéaire sur la pression de liquide; de même qu'imposer une pression d'air sec sur la pression de gaz.

A titre d'exemple, nous abordons le cas d'une pression d'air sec imposée pour un comportement LIQU\_VAPE\_GAZ, et nous supposons que nous savons écrire la relation non linéaire reliant la pression de vapeur et la pression de liquide.

La relation à imposer est donc :

$$p_{as} = p_{gz} - p_{vp} = p_2 - p_{vp} = p_{as}^{imp} \quad \text{éq A5.4-1}$$

En différenciant cette relation, on trouvera une condition sur les variations virtuelles de pressions :

$$dp_{as} = dp_{gz} - \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{lq}} dp_{lq} = dp_{gz} - \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{lq}} (dp_{gz} - dp_c)$$

Soit encore

$$dp_{as} = dp_2 - \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{lq}} (dp_2 - dp_1) = \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{lq}} dp_1 + \left(1 - \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{lq}}\right) dp_2$$

La formulation variationnelle serait alors :

$$\begin{aligned} & - \int_{\Omega} (\dot{m}_{lq} + \dot{m}_{vp}) \pi_1 d\Omega + \int_{\Omega} (M_{lq} + M_{vp}) \cdot \nabla \pi_1 d\Omega - \int_{\Omega} m_{as} \pi_2 d\Omega + \int_{\Omega} M_{as} \cdot \nabla \pi_2 d\Omega + \\ & + \int_{\partial \Omega_d} \mu^* (p_2 - p_{vp} - p_{as}^{imp}) d\Gamma + \int_{\partial \Omega_d} \mu \left( \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{lq}} \pi_1 + \left(1 - \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{lq}}\right) \pi_2 \right) d\Gamma \quad \forall \pi_1, \pi_2, \mu^* \end{aligned}$$

Et on trouverait :

$$\int_{\partial\Omega_d} (M_{lq} + M_{vp}) \cdot n \cdot \pi_1 d\Gamma + \int_{\partial\Omega_d} M_{as} \cdot n \cdot \pi_2 d\Gamma + \int_{\partial\Omega_d} \mu \left( \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{lq}} \pi_1 + \left( 1 - \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{lq}} \right) \pi_2 \right) d\Gamma = 0 \quad \forall \pi_1, \pi_2$$

En prenant  $\frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{lq}} \pi_1 + \left( 1 - \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{lq}} \right) \pi_2 = 0$  on trouverait :

$$\left( 1 - \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{lq}} \right) (M_{lq} + M_{vp}) \cdot n - \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{lq}} M_{as} \cdot n = 0 \quad \text{éq A5.4-2}$$