
Modèles de comportement THHM

Résumé :

Cette note présente une famille de lois de comportement THM pour les milieux saturés et non saturés. On y décrit les relations permettant de calculer les quantités hydrauliques et thermiques, en tenant compte de couplages forts entre ces phénomènes et aussi avec les déformations mécaniques. Les relations présentées ici peuvent être couplées avec n'importe quelle loi de comportement mécanique, sous réserve de faire l'hypothèse dite des contraintes effectives de Bishop et que la loi de comportement mécanique définisse des constantes élastiques (utiles pour les termes couplés). La partie purement mécanique des lois n'est pas présentée.

Table des Matières

| | |
|--|----|
| 1 Introduction..... | 5 |
| 2 Présentation du problème : Hypothèses, Notations..... | 6 |
| 2.1 Description du milieu poreux..... | 6 |
| 2.2 Notations..... | 6 |
| 2.2.1 Variables descriptives du milieu..... | 6 |
| 2.2.1.1 Variables géométriques..... | 7 |
| 2.2.1.2 Variables d'état thermodynamique..... | 7 |
| 2.2.1.3 Champs descriptifs du milieu..... | 8 |
| 2.2.2 Dérivées particulières..... | 8 |
| 2.2.3 Grandeurs..... | 8 |
| 2.2.3.1 Grandeurs caractéristiques du milieu hétérogène..... | 9 |
| 2.2.3.2 Grandeurs mécaniques..... | 9 |
| 2.2.3.3 Grandeurs hydrauliques..... | 10 |
| 2.2.3.4 Grandeurs thermiques..... | 11 |
| 2.2.4 Données extérieures..... | 11 |
| 3 Équations constitutives..... | 11 |
| 3.1 Équations de conservation..... | 11 |
| 3.1.1 Équilibre mécanique..... | 11 |
| 3.1.2 Conservation des masses fluides..... | 12 |
| 3.1.3 Conservation de l'énergie : équation thermique..... | 12 |
| 3.2 Équations de comportement..... | 12 |
| 3.2.1 Évolution de la porosité..... | 12 |
| 3.2.1.1 Cas général..... | 12 |
| 3.2.1.2 Cas sans couplage mécanique..... | 13 |
| 3.2.2 Évolution des apports de masse fluide..... | 13 |
| 3.2.3 Lois de comportement des fluides..... | 14 |
| 3.2.3.1 Liquide..... | 14 |
| 3.2.3.2 Gaz..... | 14 |
| 3.2.4 Évolution des enthalpies..... | 14 |
| 3.2.4.1 Enthalpie liquide..... | 14 |
| 3.2.4.2 Enthalpie des gaz..... | 15 |
| 3.2.4.3 Apport de chaleur hors fluides..... | 15 |
| 3.2.5 Lois de diffusion..... | 16 |
| 3.2.5.1 Diffusion de la chaleur..... | 16 |
| 3.2.5.2 Diffusion des fluides..... | 16 |
| 3.2.6 Équilibre eau-vapeur..... | 19 |
| 3.2.7 Équilibre air sec-air dissous..... | 19 |
| 3.2.8 Le comportement mécanique..... | 20 |

| | |
|--|----|
| 3.2.9 Précisions sur les termes de transferts diphasiques..... | 20 |
| 3.2.9.1 L'isotherme de sorption..... | 20 |
| 3.2.9.2 Le modèle Mualem - Van Genuchten..... | 20 |
| 3.2.10 Récapitulatif des caractéristiques du matériau et des données utilisateur..... | 22 |
| 3.3 L'état de référence et l'état initial..... | 23 |
| 3.4 Inconnues nodales, valeurs initiales et valeurs de référence..... | 24 |
| 3.5 Contraintes effectives et contraintes totales. Conditions aux limites de contrainte..... | 25 |
| 3.6 Quelques valeurs numériques..... | 25 |
| 4 Calcul des contraintes généralisées..... | 26 |
| 4.1 Cas sans air dissous..... | 27 |
| 4.1.1 Calcul de la porosité et de la masse volumique du fluide..... | 27 |
| 4.1.2 Calcul des coefficients de dilatation..... | 27 |
| 4.1.3 Calcul des enthalpies fluides..... | 27 |
| 4.1.4 Pressions de vapeur et d'air..... | 27 |
| 4.1.5 Calcul des apports massiques..... | 28 |
| 4.1.6 Calcul de la capacité calorifique et de la chaleur Q'..... | 28 |
| 4.1.7 Calcul des contraintes mécaniques..... | 29 |
| 4.1.8 Calcul des flux hydriques et thermiques..... | 29 |
| 4.2 Cas avec air dissous..... | 30 |
| 4.2.1 Calcul de la porosité..... | 30 |
| 4.2.2 Calcul des coefficients de dilatation..... | 30 |
| 4.2.3 Calcul des pressions de vapeur, d'air dissous et sec et des masses volumiques..... | 30 |
| 4.2.4 Calcul des enthalpies fluides..... | 32 |
| 4.2.5 Calcul des apports massiques..... | 32 |
| 4.2.6 Calcul de la capacité calorifique et de la chaleur Q'..... | 33 |
| 4.2.7 Calcul des contraintes mécaniques..... | 33 |
| 4.2.8 Calcul des flux hydriques et thermiques..... | 33 |
| 5 Calcul des dérivées des contraintes généralisées..... | 34 |
| 5.1 Dérivées des contraintes..... | 34 |
| 5.2 Dérivées des apports massiques..... | 34 |
| 5.2.1 Cas sans air dissous..... | 35 |
| 5.2.2 Cas avec air dissous..... | 36 |
| 5.3 Dérivées des enthalpies et de la chaleur Q'..... | 37 |
| 5.3.1 Cas sans air dissous..... | 37 |
| 5.3.2 Cas avec air dissous..... | 37 |
| 5.4 Dérivées du flux de chaleur..... | 37 |
| 5.5 Dérivée des flux hydriques..... | 38 |
| 5.5.1 Cas sans air dissous..... | 38 |
| 5.5.2 Cas avec air dissous..... | 39 |
| 6 Bibliographie..... | 43 |
| 7 Description des versions du document..... | 43 |

| | |
|--|--------------------|
| Annexe 1 Contraintes généralisées et variables internes..... | 44 |
| Annexe 2 Données matériau..... | 45 |
| Annexe 3 Dérivées des pressions en fonction des déformations généralisées..... | 48 |
| Annexe 4 Dérivées secondes des pressions de vapeur et d'air dissous en fonction des déformations généralisées..... | 49 |
| Annexe 5 Équivalence avec les formulations ANDRA..... | 51 |

1 Introduction

Nous présentons ici une famille de lois de comportement `THM` pour les milieux saturés et non saturés. Nous décrivons les relations permettant de calculer les quantités hydrauliques et thermiques, en tenant compte de couplages forts entre ces phénomènes et aussi avec les déformations mécaniques. Les relations présentées ici peuvent être couplées avec n'importe quelle loi de comportement mécanique, sous réserve de faire l'hypothèse dite des contraintes effectives de Bishop et que la loi de comportement mécanique définisse des constantes élastiques (utiles pour les termes couplés). Pour cette raison, la partie purement mécanique des lois n'est pas présentée ici.

Les modélisations retenues s'appuient sur la présentation des milieux poreux élaborée notamment par O. Coussy [bib1]. Les relations de comportement sont obtenues à partir de considérations thermodynamiques et avec des arguments d'homogénéisation que nous ne présentons pas ici, et qui sont entièrement décrits dans le document de P. Charles [bib2]. De même l'écriture générale des équations d'équilibre et de conservation n'est pas détaillée, et l'on renvoie le lecteur aux documents [R5.03.01] [bib3] et [R7.01.10] [bib4], lesquels contiennent des définitions utiles à la compréhension du présent document.

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.

Chacun des constituants du milieu poreux a donc un comportement mécanique, hydraulique et thermique. La théorie tente de rassembler tous ces phénomènes physiques. Les phénomènes chimiques (transformations des constituants, réactions produisant des constituants etc...), de même que les phénomènes radiologiques ne sont pas pris en compte à ce stade du développement de `Code_Aster`. Les phénomènes mécaniques, hydrauliques et thermiques sont pris en compte ou non selon le comportement invoqué par l'utilisateur dans la commande `STAT_NON_LINE`, selon la nomenclature suivante :

| Modélisation | Phénomènes pris en compte |
|-----------------------|---|
| <code>KIT_H</code> | Hydraulique avec une pression inconnue |
| <code>KIT_HM</code> | Mécanique, hydraulique avec une pression inconnue |
| <code>KIT_HHM</code> | Mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues |
| <code>KIT_THH</code> | Thermique, hydraulique avec deux pressions inconnues |
| <code>KIT_THM</code> | Thermique, mécanique, hydraulique avec une pression inconnue |
| <code>KIT_THHM</code> | Thermique, mécanique, hydraulique avec deux pressions inconnues |

Le document présent décrit les lois pour le cas le plus général dit `THHM`. Les cas plus simples s'obtiennent à partir du cas général en annulant simplement les quantités absentes.

2 Présentation du problème : Hypothèses, Notations

Dans le présent chapitre, on s'attache principalement à présenter le milieu poreux et ses caractéristiques.

2.1 Description du milieu poreux

Le milieu poreux considéré est un volume constitué d'une matrice solide plus ou moins homogène, plus ou moins cohérente (très cohérente dans le cas du béton, peu dans le cas du sable). Entre les éléments solides, on trouve des pores. On distingue les pores fermés qui n'échangent rien avec leurs voisins et les pores connectés dans lesquels les échanges sont nombreux. Lorsque l'on parle de porosité, c'est bien de ces pores connectés dont on parle.

A l'intérieur de ces pores se trouvent un certain nombre de fluides (on exclut la solidification de ces fluides), présents éventuellement sous plusieurs phases (liquide ou gazeuse exclusivement), et présentant une interface avec les autres constituants. Pour simplifier le problème et prendre en compte l'importance relative des phénomènes physiques, la seule interface considérée est celle entre le liquide et le gaz, les interfaces fluide/solide étant négligées.

2.2 Notations

Nous supposons que les pores du solide sont occupés par au plus deux constituants, chacun coexistant dans deux phases au maximum, l'une liquide et l'autre gazeuse. Les grandeurs X associées à la phase j ($j=1,2$) du fluide i seront notées : X_{ij} . Quand il y a deux constituants en plus du solide, ce sont un liquide (typiquement l'eau) et un gaz (typiquement l'air sec), sachant que le liquide peut être présent sous forme gazeuse (vapeur) dans le mélange gazeux et que l'air peut être présent sous forme dissous dans l'eau. Quand il n'y a qu'un seul constituant en plus du solide, cela peut être un liquide ou un gaz. Par la suite on parlera d'air pour le composant gazeux, mais il peut s'agir de n'importe quel autre composant (hydrogène, CO_2 etc.).

Le milieu poreux à l'instant actuel est noté Ω , sa frontière $\partial\Omega$. Il est noté $\Omega_0, \partial\Omega_0$ à l'instant initial.

Le milieu est défini par :

- des paramètres (vecteur position x , temps t),
- des variables (déplacements, pressions, température),
- des grandeurs intrinsèques (contraintes et déformations, apports massiques, chaleur, enthalpies, flux hydrauliques, thermiques...).

Les hypothèses générales effectuées sont les suivantes :

- hypothèse des petits déplacements,
- évolutions thermodynamiques réversibles (pas nécessairement pour la mécanique),
- comportement isotrope,
- les gaz sont des gaz parfaits,
- mélange idéal de gaz parfaits (pression totale = somme des pressions partielles),
- équilibre thermodynamique entre les phases d'un même constituant.

Les différentes notations sont explicitées ci-après.

2.2.1 Variables descriptives du milieu

Ce sont les variables dont la connaissance en fonction du temps et du lieu permettent de connaître complètement l'état du milieu. Ces variables se décomposent en deux catégories :

- variables géométriques,

- variables d'état thermodynamique.

2.2.1.1 Variables géométriques

Dans tout ce qui suit, on adopte une représentation lagrangienne par rapport au squelette (au sens de [bib1]) et les coordonnées $\mathbf{x} = \mathbf{x}_s(t)$ sont celles d'un point matériel attaché au squelette. Tous les opérateurs de dérivation spatiaux sont définis par rapport à ces coordonnées.

Les déplacements du squelette sont notés $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix}$.

2.2.1.2 Variables d'état thermodynamique

De façon générale, on utilise 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 : $p_w(\mathbf{x}, t)$, $p_{ad}(\mathbf{x}, t)$, $p_{vp}(\mathbf{x}, t)$, $p_{as}(\mathbf{x}, t)$,
- la température du milieu : $T(\mathbf{x}, t)$.

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 est libre (combinaisons des pressions des constituants) à condition que les pressions choisies, associées à la température, forment un système de variables indépendantes.

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 : $p_{gz}(\mathbf{x}, t) = p_{vp} + p_{as}$,
- la pression capillaire : $p_c(\mathbf{x}, t) = p_{gz} - p_{lq} = p_{gz} - p_w - p_{ad}$.

Ces pressions ont une interprétation physique très forte, la pression de gaz totale pour des raisons évidentes, et la pression capillaire, également appelée suction, parce que les phénomènes capillaires sont très importants dans la modélisation présentée ici. Il aurait été possible également de choisir la pression de vapeur ou le degré d'humidité relative (rapport entre la pression de vapeur et la pression de vapeur saturante à la même température) physiquement accessible. La modélisation devient alors plus complexe et de toute façon, pression capillaire, pression de gaz et degré d'humidité relative (rapport entre la pression de vapeur et la pression de vapeur saturante) sont reliés par la loi de Kelvin.

Pour le cas particulier du comportement dit 'LIQU_GAZ_ATM' on fait l'hypothèse dite de Richards : les pores ne sont pas saturés par le liquide, mais la pression du gaz est supposée constante et la seule variable de pression est la pression de liquide.

2.2.1.3 Champs descriptifs du milieu

Les inconnues principales, qui sont aussi les inconnues nodales (notées $\mathbf{U}(\mathbf{x}, t)$ dans ce document) sont :

- 2 ou 3 (selon la dimension d'espace) déplacements $u_x(\mathbf{x}, t), u_y(\mathbf{x}, t), u_z(\mathbf{x}, t)$ pour les modélisations `KIT_HM`, `KIT_HHM`, `KIT_THM`, `KIT_THHM`,
- la température $T(\mathbf{x}, t)$ pour les modélisations `KIT_THH`, `KIT_THM`, `KIT_THHM`,
- deux pressions $p_1(\mathbf{x}, t), p_2(\mathbf{x}, t)$ (qui sont $p_c(\mathbf{x}, t), p_{gz}(\mathbf{x}, t)$ dans le cas étudié) pour les modélisations `KIT_HHM`, `KIT_THH`, `KIT_THHM`,
- une pression $p_1(\mathbf{x}, t)$ (qui est $p_w(\mathbf{x}, t)$ ou $p_{gz}(\mathbf{x}, t)$ selon que le milieu est saturé par un liquide ou un gaz) pour les modélisations `KIT_H`, `KIT_HM`, `KIT_THM`.

2.2.2 Dérivées particulières

Ce paragraphe reprend en partie le paragraphe « dérivées particulières, densités volumiques et massiques » du document [R7.01.10]. La description que nous faisons du milieu est lagrangienne par rapport au squelette.

Soit a un champ quelconque sur Ω , soit $\mathbf{x}_s(t)$ la coordonnée d'un point attaché au squelette que nous suivons dans son mouvement et soit $\mathbf{x}_f(t)$ la coordonnée d'un point attaché au fluide. On note

$\dot{a} = \frac{d^S a}{dt}$ la dérivée temporelle dans le mouvement du squelette :

$$\dot{a} = \frac{d^S a}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{a(\mathbf{x}(t + \Delta t), (t + \Delta t)) - a(\mathbf{x}(t), t)}{\Delta t}$$

\dot{a} est appelée dérivée particulière et souvent notée $\frac{da}{dt}$. Nous préférons utiliser une notation qui rappelle que la configuration utilisée pour repérer une particule est celle du squelette par rapport auquel une particule de fluide a une vitesse relative. Pour une particule de fluide le repérage $x_s(t)$ est quelconque, c'est à dire que la particule de fluide qui occupe la position $\mathbf{x}_s(t)$ à l'instant t n'est pas la même que celle qui occupe la position $\Omega^0(1 + \varepsilon_V)(1 - \varphi) = \Omega^0(1 - \varphi^0)(1 + \varepsilon_{V_s})$ à un autre instant t' .

2.2.3 Grandeurs

Les équations d'équilibre sont :

- la conservation de la quantité de mouvement pour la mécanique,
- la conservation des masses de fluide pour l'hydraulique,
- la conservation de l'énergie pour la thermique.

L'écriture de ces équations est donnée dans le document [R7.01.10] [bib4], lequel définit aussi ce que nous appelons de façon générale une loi de comportement `THM` et donne les définitions des contraintes et déformations généralisées. Le présent document utilise ces définitions. Les équations d'équilibre font intervenir directement les contraintes généralisées.

Les contraintes généralisées sont reliées aux déformations généralisées par les lois de comportement. Les déformations généralisées se calculent directement à partir des variables d'état et de leurs gradients spatiaux temporels.

Les lois de comportements peuvent utiliser des quantités annexes, souvent rangées dans les variables internes. Nous regroupons ici sous le vocable de grandeur à la fois les contraintes, les déformations et des grandeurs annexes.

2.2.3.1 Grandeurs caractéristiques du milieu hétérogène

- La porosité eulérienne : φ .

Si on note $\Omega_{(\varphi)}$ la partie du volume Ω occupé par les vides dans la configuration courante, on a :

$$\varphi = \frac{\Omega_{(\varphi)}}{\Omega}$$

La définition de la porosité est donc celle de la porosité eulérienne.

- La saturation en liquide : S_{lq}

Si on note Ω_{lq} le volume total occupé par le liquide, dans la configuration courante, on a par définition :

$$S_{lq} = \frac{\Omega_{lq}}{\Omega_{\varphi}}$$

Cette saturation est donc finalement une proportion variant entre 0 et 1.

- Les masses volumiques eulériennes de l'eau ρ_w , de l'air dissous ρ_{ad} , de l'air sec ρ_{as} , de la vapeur ρ_{vp} , du gaz ρ_{gz} .

Si on note γ_w (resp γ_{ad} , γ_{as} , γ_{vp}) les masses d'eau (resp d'air dissous, d'air sec et de vapeur) contenus dans un volume du Ω squelette dans la configuration courante, on a par définition :

$$\begin{aligned} \gamma_w &= \int_{\Omega} \rho_w S_{lq} \varphi d\Omega & \gamma_{ad} &= \int_{\Omega} \rho_{ad} S_{lq} \varphi d\Omega \\ \gamma_{as} &= \int_{\Omega} \rho_{as} (1 - S_{lq}) \varphi d\Omega & \gamma_{vp} &= \int_{\Omega} \rho_{vp} (1 - S_{lq}) \varphi d\Omega \end{aligned}$$

La masse volumique du mélange gazeux est simplement la somme des masses volumiques de l'air sec et de la vapeur :

$$\rho_{gz} = \rho_{as} + \rho_{vp}$$

De même pour le mélange liquide :

$$\rho_{lq} = \rho_w + \rho_{ad}$$

On note ρ_w^0 , ρ_{ad}^0 , ρ_{vp}^0 , ρ_{as}^0 les valeurs initiales des masses volumiques.

- La masse volumique homogénéisée lagrangienne : r .

À l'instant courant la masse du volume Ω , M_{Ω} , est donnée par : $M_{\Omega} = \int_{\Omega_0} r d\Omega_0$.

2.2.3.2 Grandeurs mécaniques

- Le tenseur des déformations $\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u})(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + {}^T \nabla \mathbf{u})$.

On notera $\epsilon_V = tr(\boldsymbol{\varepsilon})$.

- Le tenseur des contraintes qui s'exercent sur le milieu poreux : $\boldsymbol{\sigma}$.

Ce tenseur se décompose en un tenseur des contraintes effectives plus un tenseur de contraintes de pression $\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' + \sigma_p \mathbf{I}$ et σ_p sont des composantes des contraintes

généralisées. Ce découpage est finalement assez arbitraire, mais correspond tout de même à une hypothèse assez communément admise, au moins pour les milieux saturés en liquide.

2.2.3.3 Grandeurs hydrauliques

- Les apports massiques en constituants $m_w, m_{ad}, m_{vp}, m_{as}$ (unité : kilogramme par mètre cube).
Ils représentent la masse de fluide apportée entre les instants initiaux et actuels. Ils font partie des contraintes généralisées.
- Les flux hydrauliques $\mathbf{M}_w, \mathbf{M}_{ad}, \mathbf{M}_{vp}, \mathbf{M}_{as}$ (unité : kilogramme/seconde/mètre carré).
On pourrait très bien ne donner aucune définition plus précise des apports de masse et des flux, considérant que leur définition se résume à vérifier les équations d'équilibre hydraulique :

$$\begin{cases} \dot{m}_w + \dot{m}_{vp} + \text{Div}(\mathbf{M}_w + \mathbf{M}_{vp}) = 0 \\ \dot{m}_{as} + \dot{m}_{ad} + \text{Div}(\mathbf{M}_{as} + \mathbf{M}_{ad}) = 0 \end{cases} \quad \text{éq 2.2.3.3-1}$$

Nous allons néanmoins préciser le sens physique des ces grandeurs, sachant que ce que nous écrivons maintenant est déjà une loi de comportement.
Les vitesses des constituants sont mesurées dans un référentiel fixe en espace et en temps.

On note \mathbf{v}_w la vitesse de l'eau, \mathbf{v}_{ad} celle de l'air dissous, \mathbf{v}_{vp} celle de la vapeur, \mathbf{v}_{as} celle de l'air sec, et $\mathbf{v}_s = \frac{d\mathbf{u}}{dt}$ celle du squelette.

Les apports massiques sont définis par :

$$\begin{aligned} m_w &= \rho_w (1 + \varepsilon_V) \varphi S_{lq} - \rho_w^0 \varphi^0 S_{lq}^0 \\ m_{ad} &= \rho_{ad} (1 + \varepsilon_V) \varphi S_{lq} - \rho_{ad}^0 \varphi^0 S_{lq}^0 \\ m_{as} &= \rho_{as} (1 + \varepsilon_V) \varphi (1 - S_{lq}) - \rho_{as}^0 \varphi^0 (1 - S_{lq}^0) \\ m_{vp} &= \rho_{vp} (1 + \varepsilon_V) \varphi (1 - S_{lq}) - \rho_{vp}^0 \varphi^0 (1 - S_{lq}^0) \end{aligned} \quad \text{éq 2.2.3.3-2}$$

Les flux massiques sont définis par :

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_w &= \rho_w \varphi S_l (\mathbf{v}_w - \mathbf{v}_s) \\ \mathbf{M}_{ad} &= \rho_{ad} \varphi S_l (\mathbf{v}_{ad} - \mathbf{v}_s) \\ \mathbf{M}_{as} &= \rho_{as} \varphi (1 - S_l) (\mathbf{v}_{as} - \mathbf{v}_s) \\ \mathbf{M}_{vp} &= \rho_{vp} \varphi (1 - S_l) (\mathbf{v}_{vp} - \mathbf{v}_s) \end{aligned} \quad \text{éq 2.2.3.3-3}$$

Les apports massiques permettent de définir la masse volumique globale vue par rapport à la configuration de référence :

$$r = r_0 + m_w + m_{ad} + m_{vp} + m_{as} \quad \text{éq 2.2.3.3-4}$$

où r_0 désigne la masse volumique homogénéisée à l'instant initial.

On introduit d'autres grandeurs hydrauliques intermédiaires :

- concentration de la vapeur dans le gaz : $C_{vp} = \frac{P_{vp}}{P_{gz}}$,
- flux de gaz : $\frac{\mathbf{M}_{gz}}{\rho_{gz}} = \left(1 - C_{vp}\right) \frac{\mathbf{M}_{as}}{\rho_{as}} + C_{vp} \frac{\mathbf{M}_{vp}}{\rho_{vp}}$. Cette équation précise que la vitesse du gaz est obtenue en faisant une moyenne (somme pondérée) des vitesses des différents gaz en fonction de leur concentration,
- la pression de vapeur P_{vp} .

2.2.3.4 Grandeurs thermiques

- la chaleur non convectée Q' (voir plus loin) (unité : Joule),
- les enthalpies massiques des constituants h_{ij}^m ($h_w^m, h_{ad}^m, h_{vp}^m, h_{as}^m$) (unité : Joule/Kelvin/kilogramme),
- le flux de chaleur : \mathbf{q} (unité : $J/s/m^2$).

Toutes ces grandeurs appartiennent aux contraintes généralisées au sens du document [R7.01.10] [bib4].

2.2.4 Données extérieures

- la force massique \mathbf{F}^m (en pratique la gravité),
- les sources de chaleur Θ ,
- les conditions aux limites portant soit sur des variables imposées, soit sur des flux imposés.

3 Équations constitutives

3.1 Équations de conservation

Il ne s'agit ici que d'un rappel, la façon de les établir est présentée dans [R7.01.10] [bib4].

3.1.1 Équilibre mécanique

En notant $\boldsymbol{\sigma}$ le tenseur des contraintes mécaniques totales et r la masse volumique homogénéisée du milieu, l'équilibre mécanique s'écrit :

$$\text{Div}(\boldsymbol{\sigma}) + r \mathbf{F}^m = \mathbf{0} \quad \text{éq 3.1.1-1}$$

Nous rappelons que r est reliée aux variations de masse fluide par la relation :

$$r = r_0 + m_w + m_{ad} + m_{vp} + m_{as} \quad \text{éq 3.1.1-2}$$

3.1.2 Conservation des masses fluides

Pour le fluide la dérivée $\dot{a} = \frac{d^s a}{dt}$ est en fait une dérivée eulérienne et les équations que nous écrivons pour le fluide comportent des termes de transport, même s'ils peuvent être cachés par le choix des inconnues. Les équations de conservation des masses fluides s'écrivent alors :

$$\begin{cases} \dot{m}_w + \dot{m}_{vp} + Div(M_w + M_{vp}) = 0 \\ \dot{m}_{as} + \dot{m}_{ad} + Div(M_{as} + M_{ad}) = 0 \end{cases} \quad \text{éq 3.1.2-1}$$

3.1.3 Conservation de l'énergie : équation thermique

$$\begin{aligned} h_w^m \dot{m}_w + h_{ad}^m \dot{m}_{ad} + h_{vp}^m \dot{m}_{vp} + h_{as}^m \dot{m}_{as} + \dot{Q}' + Div(h_w^m \mathbf{M}_w + h_{ad}^m \mathbf{M}_{ad} + h_{vp}^m \mathbf{M}_{vp} + h_{as}^m \mathbf{M}_{as}) + Div(\mathbf{q}) = \\ (\mathbf{M}_w + \mathbf{M}_{ad} + \mathbf{M}_{vp} + \mathbf{M}_{as}) F^m + \Theta \end{aligned} \quad \text{éq 3.1.3-1}$$

3.2 Équations de comportement

3.2.1 Évolution de la porosité

3.2.1.1 Cas général

$$d\varphi = (b - \varphi) \left(d\varepsilon_V - 3\alpha_0 dT + \frac{dp_{gz} - S_{lq} dp_c}{K_s} \right) \quad \text{éq 3.2.1-1}$$

Dans cette équation, on voit apparaître les coefficients b et K_s . b est le coefficient de Biot et K_s est le module de compressibilité des grains solides. Si K_0 désigne le module de compressibilité « drainé » du milieu poreux, on a la relation :

$$b = 1 - \frac{K_0}{K_s} \quad \text{éq 3.2.1-2}$$

Remarque :

L'expression 3.2.1-1 peut paraître inhabituelle compte tenu de la définition standard du coefficient de Biot. Cela est dû au fait que nous utilisons la porosité eulérienne φ alors que la définition habituelle du coefficient de Biot se base sur la définition lagrangienne Φ de cette quantité.

Les deux définitions sont reliées par la relation :

$$\Phi = (1 + \varepsilon_V) \varphi \quad \text{éq 3.2.1-3}$$

Dans le cas d'une évolution isotherme pour un milieu saturé, la variation de porosité lagrangienne est simplement proportionnelle à la variation de volume :

$$d\Phi = b \cdot d\varepsilon_V \quad \text{éq 3.2.1-4}$$

Reportant éq 3.2.1-4 dans éq 3.2.1-3, on trouve :

$$(1 + \varepsilon_V) d\varphi = (b - \varphi) d\varepsilon_V$$

Pour ε_V petit (hypothèse retenue dans les modélisations THM), on obtient $d\varphi = (b - \varphi) d\varepsilon_V$, qui correspond bien à [éq 3.2.1-1] pour le cas examiné.

3.2.1.2 Cas sans couplage mécanique

Pour les modélisations purement hydrauliques ou thermo-hydrauliques sans couplage mécanique, il est toutefois possible de faire varier la porosité via un coefficient d'emménagement E_m . Ce dernier relie alors la variation de porosité à la variation de pression de liquide tel que :

$$d\varphi = E_m dp_{lq}$$

Ce coefficient n'est pas pris en compte dans le cas des modélisations avec mécanique (*HM*)

3.2.2 Évolution des apports de masse fluide

En utilisant la définition des apports de masse fluide et en faisant valoir des arguments purement géométriques, on trouve :

$$\begin{aligned} m_w &= \rho_w (1 + \varepsilon_V) \varphi S_{lq} - \rho_w^0 \varphi^0 S_{lq}^0 \\ m_{ad} &= \rho_{ad} (1 + \varepsilon_V) \varphi S_{lq} - \rho_{ad}^0 \varphi^0 S_{lq}^0 \\ m_{as} &= \rho_{as} (1 + \varepsilon_V) \varphi (1 - S_{lq}) - \rho_{as}^0 \varphi^0 (1 - S_{lq}^0) \\ m_{vp} &= \rho_{vp} (1 + \varepsilon_V) \varphi (1 - S_{lq}) - \rho_{vp}^0 \varphi^0 (1 - S_{lq}^0) \end{aligned} \quad \text{éq 3.2.2-1}$$

Remarque :

Si nous utilisons la porosité lagrangienne, les apports massique s'écriraient :

$$\begin{aligned} m_w &= \rho_w \varphi S_{lq} - \rho_w^0 \varphi^0 S_{lq}^0 \\ m_{ad} &= \rho_{ad} \varphi S_{lq} - \rho_{ad}^0 \varphi^0 S_{lq}^0 \\ m_{as} &= \rho_{as} \varphi (1 - S_{lq}) - \rho_{as}^0 \varphi^0 (1 - S_{lq}^0) \\ m_{vp} &= \rho_{vp} \varphi (1 - S_{lq}) - \rho_{vp}^0 \varphi^0 (1 - S_{lq}^0) \end{aligned}$$

A titre d'exemple, nous démontrons la première relation dans le cas saturé $S_{lq} = 1$ (avec $\rho_{lq} = \rho_w$). Soit un domaine élémentaire de milieu poreux de volume Ω . On note Ω_s le volume occupé par les grains solides et Ω_l le volume occupé par le liquide et le gaz. On note Ω^0 , Ω_s^0 , Ω_l^0 les mêmes volumes à l'état initial. Nous rappelons que ε_V note la variation de volume du milieu poreux et nous notons ε_{Vs} la variation volumique des grains solides.

On a par définition : $\varphi = \frac{\Omega_l}{\Omega}$

$$\Omega_s = \Omega - \Omega_l = \Omega (1 - \varphi) = \Omega_s^0 (1 + \varepsilon_{Vs})$$

Mais $\Omega (1 - \varphi) = \Omega^0 (1 + \varepsilon_V) (1 - \varphi)$.

On en déduit :

$$\Omega^0 (1 + \varepsilon_V) (1 - \varphi) = \Omega_s^0 (1 + \varepsilon_{Vs})$$

Il suffit d'écrire alors $\Omega_s^0 = \Omega^0 (1 - \varphi^0)$ pour obtenir :

$$\Omega^0 (1 + \varepsilon_V) (1 - \varphi) = \Omega^0 (1 - \varphi^0) (1 + \varepsilon_{Vs})$$

D'où l'on déduit :

$$\varepsilon_{Vs} (1 - \varphi^0) = \varepsilon_V (1 - \varphi) - (\varphi - \varphi^0)$$

On utilise la définition eulérienne de la masse volumique homogénéisée r' (à ne pas confondre avec la définition lagrangienne de l'équation [éq 3.1.1-2]) :

$$r' = \rho_{(s)}(1 - \varphi) + \rho_{(lq)}\varphi$$

et la définition de l'apport massique en liquide :

$$r' \Omega = (r_0 + m_{lq}) \Omega^0$$

On obtient :

$$\rho_s(1 - \varphi) \Omega + \rho_{lq}\varphi \Omega = \rho_{i,s}^0(1 - \varphi^0) \Omega^0 + \rho_{i,lq}^0\varphi^0 \Omega^0 + m_{lq} \Omega^0$$

soit encore :

$$\rho_s \Omega_s + \rho_{lq}\varphi(1 + e_V) \Omega^0 = \rho_s^0 \Omega_s^0 + \rho_{lq}^0 \varphi^0 \Omega^0 + m_{lq} \Omega^0$$

Utilisant la conservation de la masse des grains solides : $\rho_s \Omega_s = \rho_s^0 \Omega_s^0$ on obtient finalement :

$$\rho_{lq}\varphi(1 + \varepsilon_V) = \rho_{lq}^0 \varphi^0 + m_{lq}$$

3.2.3 Lois de comportement des fluides

3.2.3.1 Liquide

$$\frac{d\rho_w}{\rho_w} = \frac{dp_w}{K_w} - 3\alpha_w dT \quad \text{éq 3.2.3.1-1}$$

On voit apparaître le module de compressibilité de l'eau K_w et son module de dilatation α_w .

3.2.3.2 Gaz

Pour les équations de comportement des gaz, on prend la loi des gaz parfaits :

$$\frac{p_{vp}}{\rho_{vp}} = \frac{R}{M_{vp}^{ol}} T \quad \text{éq 3.2.3.2-1}$$

$$\frac{p_{as}}{\rho_{as}} = \frac{R}{M_{as}^{ol}} T \quad \text{éq 3.2.3.2-2}$$

On voit apparaître la masse molaire de la vapeur, M_{vp}^{ol} , et celle de l'air sec, M_{as}^{ol} .

3.2.4 Évolution des enthalpies

3.2.4.1 Enthalpie liquide

$$dh_w^m = C_w^p dT + (1 - 3\alpha_w T) \frac{dp_w}{\rho_w} \quad \text{éq 3.2.4.1-1}$$

On voit apparaître la chaleur massique à pression constante de l'eau : C_w^p .

En remplaçant dans cette expression la pression du liquide par sa valeur en fonction de la pression capillaire et de la pression du gaz, on a :

$$dh_w^m = (1 - 3\alpha_w T) \frac{dp_{gz} - dp_c - dp_{ad}}{\rho_w} + C_w^p dT \quad \text{éq 3.2.4.1-2}$$

En notant C_{ad}^p la chaleur massique à pression constante de l'air dissous, on a :

$$dh_{ad}^m = C_{ad}^p dT \quad \text{éq 3.2.4.1-3}$$

3.2.4.2 Enthalpie des gaz

$$dh_{vp}^m = C_{vp}^p dT \quad \text{éq 3.2.4.2-1}$$

$$dh_{as}^m = C_{as}^p dT \quad \text{éq 3.2.4.2-2}$$

On voit apparaître la chaleur massique à pression constante de l'air sec C_{as}^p et celle de la vapeur C_{vp}^p .

3.2.4.3 Apport de chaleur hors fluides

C'est la quantité $\delta Q'$ qui représente la chaleur reçue par le système hors apport enthalpique des fluides.

$$\delta Q' = 3\alpha_0 K_0 T d\varepsilon_v + 3\alpha_{lq}^m T dp_c - (3\alpha_{gz}^m + 3\alpha_{lq}^m) T dp_{gz} + C_\varepsilon^0 dT \quad \text{éq 3.2.4.3-1}$$

On voit apparaître plusieurs coefficients de dilatation : $\alpha_0, \alpha_{lq}^m, \alpha_{gz}^m$. Le coefficient α_0 est une donnée : il correspond à la fois au coefficient de dilatation du milieu poreux et à celui des grains solides (qui se trouvent être forcément égaux dans la théorie que nous présentons ici).

$\alpha_{lq}^m, \alpha_{gz}^m$ sont donnés par les relations :

$$\alpha_{gz}^m = (1 - S_{lq}) (b - \varphi) \alpha_0 + \frac{\varphi (1 - S_{lq})}{3T} \quad \text{éq 3.2.4.3-2}$$

$$\alpha_{lq}^m = S_{lq} (b - \varphi) \alpha_0 + \alpha_{lq} \varphi S_{lq} \quad \text{éq 3.2.4.3-3}$$

On voit également apparaître dans [éq 3.2.4.3-1] la chaleur spécifique à déformation constante du milieu poreux C_ε^0 , qui dépend de la chaleur spécifique à contrainte constante du milieu poreux C_σ^0 par la relation :

$$C_\varepsilon^0 = C_\sigma^0 - 9TK_0 \alpha_0^2 \quad \text{éq 3.2.4.3-4}$$

C_σ^0 est donnée par une loi de mélange :

$$C_\sigma^0 = (1 - \varphi) \rho_s C_\sigma^s + S_{lq} \varphi (\rho_w C_w^p + \rho_{ad} C_{ad}^p) + \varphi (1 - S_{lq}) (\rho_{vp} C_{vp}^p + \rho_{as} C_{as}^p) \quad \text{éq 3.2.4.3-5}$$

où C_σ^s représente la chaleur spécifique à contrainte constante des grains solides et ρ_s la masse volumique des grains solides. Pour le calcul de ρ_s , on néglige la déformation des grains solides, on confond donc ρ_s avec sa valeur initiale ρ_s^0 , laquelle se calcule en fait à partir de la masse spécifique initiale du milieu poreux r_0 par la formule suivante des mélanges :

$$(1 - \varphi^0) \rho_s^0 = r_0 - (\rho_w^0 + \rho_{ad}^0) S_{lq}^0 \varphi^0 - \varphi^0 (1 - S_{lq}^0) (\rho_{vp}^0 + \rho_{as}^0) \quad \text{éq 3.2.4.3-6}$$

3.2.5 Lois de diffusion (lois complémentaires)

3.2.5.1 Diffusion de la chaleur

On prend la loi classique de Fourier :

$$\mathbf{q} = -\lambda^T \cdot \nabla T \quad \text{éq 3.2.5.1-1}$$

où l'on voit apparaître le coefficient de conductivité thermique λ^T .

λ^T est fonction de la porosité, de la saturation et de la température et est donnée sous la forme du produit de trois fonctions plus une constante :

$$\lambda^T = \lambda_\varphi^T(\phi) \cdot \lambda_S^T(S_{lq}) \cdot \lambda_T^T(T) + \lambda_{cte}^T \quad \text{éq 3.2.5.1-2}$$

3.2.5.2 Diffusion des fluides

Ce sont les lois de Darcy, auxquelles on rajoute la loi de Fick en présence de vapeur.
Les lois de Darcy sont écrites pour le gaz et pour le liquide :

$$\frac{\mathbf{M}_{lq}}{\rho_{lq}} = \lambda_{lq}^H \left(-\nabla p_{lq} + \rho_{lq} \mathbf{F}^m \right) \quad \text{éq 3.2.5.2-1}$$

$$\frac{\mathbf{M}_{gz}}{\rho_{gz}} = \lambda_{gz}^H \left(-\nabla p_{gz} + \rho_{gz} \mathbf{F}^m \right) \quad \text{éq 3.2.5.2-2}$$

où nous voyons apparaître les conductivités hydrauliques λ_{lq}^H et λ_{gz}^H pour le liquide et le gaz respectivement.

On fait l'approximation que $\frac{\mathbf{M}_w}{\rho_w} = \lambda_w^H \left(-\nabla p_{lq} + \rho_{lq} \mathbf{F}^m \right)$.

La diffusion dans le mélange gazeux est donnée par la loi de Fick grâce à la relation :

$$\frac{\mathbf{M}_{vp}}{\rho_{vp}} - \frac{\mathbf{M}_{as}}{\rho_{as}} = -\frac{D_{vp}}{C_{vp}(1 - C_{vp})} \nabla \left(\frac{p_{vp}}{p_{gz}} \right) \quad \text{éq 3.2.5.2-3}$$

où D_{vp} est le coefficient de diffusion de Fick du mélange gazeux ($L^2.T^{-1}$), on note par la suite F_{vp} tel que :

$$F_{vp} = \frac{D_{vp}}{C_{vp}(1 - C_{vp})} \quad \text{éq 3.2.5.2-4}$$

et avec

$$C_{vp} = \frac{p_{vp}}{p_{gz}} \quad \text{éq 3.2.5.2-5}$$

On a donc :

$$\frac{\mathbf{M}_{vp}}{\rho_{vp}} - \frac{\mathbf{M}_{as}}{\rho_{as}} = -F_{vp} \nabla C_{vp} \quad \text{éq 3.2.5.2-6}$$

De plus, on a :

$$\frac{\mathbf{M}_{gz}}{\rho_{gz}} = (1 - C_{vp}) \frac{\mathbf{M}_{as}}{\rho_{as}} + C_{vp} \frac{\mathbf{M}_{vp}}{\rho_{vp}} \quad \text{éq 3.2.5.2-7}$$

et :

$$\rho_{gz} = \rho_{vp} + \rho_{as} \quad \text{éq 3.2.5.2-8}$$

Pour la diffusion du mélange liquide, l'écriture usuelle est la suivante :

$$\mathbf{M}_{ad} - \mathbf{M}_w = -D_{ad} \nabla \rho_{ad} \quad \text{éq 3.2.5.2-9}$$

où D_{ad} est le coefficient de diffusion de Fick du mélange liquide. Afin de garder une écriture homogène avec celle du mélange gazeux on note par la suite F_{ad} tel que :

$$F_{ad} = D_{ad} \quad \text{éq 3.2.5.2-10}$$

Et la concentration C_{ad} correspond ici à la masse volumique de l'air dissous :

$$C_{ad} = \rho_{ad} \quad \text{éq 3.2.5.2-11}$$

$$\mathbf{M}_{ad} - \mathbf{M}_w = -F_{ad} \nabla C_{ad} \quad \text{éq 3.2.5.2-12}$$

Concernant le liquide, on a admis que la loi de Darcy liquide s'applique à la vitesse de l'eau liquide. Il n'y a donc pas à définir de vitesse moyenne du liquide.

$$\frac{\mathbf{M}_w}{\rho_w} = \lambda_{lq}^H \left(-\nabla p_{lq} + \rho_{lq} \mathbf{F}^m \right) \quad \text{éq 3.2.5.2-13}$$

et :

$$\rho_{lq} = \rho_w + \rho_{ad} \quad \text{éq 3.2.5.2-14}$$

En combinant ces relations, on trouve alors :

$$\frac{\mathbf{M}_{as}}{\rho_{as}} = \lambda_{gz}^H \left(-\nabla p_{gz} + \rho_{gz} \mathbf{F}^m \right) + C_{vp} F_{vp} \nabla C_{vp} \quad \text{éq 3.2.5.2-15}$$

$$\frac{\mathbf{M}_{vp}}{\rho_{vp}} = \lambda_{gz}^H \left(-\nabla p_{gz} + \rho_{gz} \mathbf{F}^m \right) - (1 - C_{vp}) F_{vp} \nabla C_{vp} \quad \text{éq 3.2.5.2-16}$$

$$\frac{\mathbf{M}_w}{\rho_w} = \lambda_{lq}^H \left(-\nabla p_{lq} + \rho_{lq} \mathbf{F}^m \right) \quad \text{éq 3.2.5.2-17}$$

$$\mathbf{M}_{ad} = \rho_{ad} \lambda_{lq}^H \left(-\nabla p_{lq} + \rho_{lq} \mathbf{F}^m \right) - F_{ad} \nabla C_{ad} \quad \text{éq 3.2.5.2-18}$$

Les conductivités hydrauliques λ_{lq}^H et λ_{gz}^H ne sont pas directement des données et leur valeur est connue à partir des formules :

$$\lambda_{lq}^H = \frac{K^{int}(\varphi) \cdot k_{lq}^{rel}(S_{lq})}{\mu_w(T)} \quad \text{éq 3.2.5.2-19}$$

$$\lambda_{gz}^H = \frac{K^{int}(\varphi) \cdot k_{gz}^{rel}(S_{lq}, P_{gz})}{\mu_{gz}(T)} \quad \text{éq 3.2.5.2-20}$$

K^{int} est la perméabilité intrinsèque, caractéristique du milieu poreux et donnée utilisateur, fonction quelconque de la porosité ;

μ_w est la viscosité dynamique de l'eau, caractéristique du l'eau et donnée utilisateur, fonction quelconque de la température ;

μ_{gz} est la viscosité dynamique du gaz, caractéristique du gaz et donnée utilisateur, fonction quelconque de la température ;

k_{lq}^{rel} est la perméabilité relative au liquide, caractéristique du milieu poreux et donnée utilisateur, fonction quelconque de la saturation en liquide ;

k_{gz}^{rel} est la perméabilité relative au gaz, caractéristique du milieu poreux et donnée utilisateur, fonction quelconque de la saturation en liquide et de la pression de gaz.

Remarque :

Les conductivités hydrauliques définies ici ne sont pas forcément très familières pour les mécaniciens de sols, qui utilisent couramment pour les milieux saturés la perméabilité k , laquelle est homogène à une vitesse.

La relation entre k et λ_{lq}^H est ainsi : $\lambda_{lq}^H = \frac{k}{\rho_w g}$ où g est l'accélération de la pesanteur.

Le coefficient de diffusion de Fick du mélange gazeux F_{vp} est une caractéristique du milieu poreux, donnée utilisateur fonction quelconque de la pression de vapeur, de la pression de gaz, de la saturation et de la température que l'on écrira comme un produit de fonction de chacune de ces variables: $F_{vp}(P_{vp}, P_{gz}, T, S) = f_{vp}^{vp}(P_{vp}) \cdot f_{vp}^{gz}(P_{gz}) \cdot f_{vp}^T(T) \cdot f_{vp}^S(S)$ on négligera les dérivées par rapport à la pression de vapeur et à la saturation. De la même manière pour le coefficient de diffusion de Fick du milieu liquide : $F_{ad}(P_{ad}, P_{lq}, T, S) = f_{ad}^{ad}(P_{ad}) \cdot f_{ad}^{lq}(P_{lq}) \cdot f_{ad}^T(T) \cdot f_{ad}^S(S)$, on ne prend en compte que la dérivée en fonction de la température.

3.2.6 Équilibre eau-vapeur

Cette relation est essentielle et elle a pour conséquence de réduire le nombre d'inconnues de pression.

On note h_w^m l'enthalpie massique de l'eau, s_w^m son entropie et $g_w^m = h_w^m - Ts_w^m$ son enthalpie libre.

On note h_{vp}^m l'enthalpie massique de la vapeur, s_{vp}^m son entropie et $g_{vp}^m = h_{vp}^m - Ts_{vp}^m$ son enthalpie libre.

L'équilibre eau vapeur s'écrit :

$$g_{vp}^m = g_w^m \quad \text{éq 3.2.6-1}$$

Qui donne :

$$h_{vp}^m - h_w^m = T (s_{vp}^m - s_w^m) \quad \text{éq 3.2.6-2}$$

Par ailleurs, la définition de l'enthalpie libre nous apprend que : $dg = \frac{dp}{\rho} - sdT$, ce qui, appliqué à la vapeur et à l'eau, combiné à la relation $dg_{vp}^m = dg_w^m$ et en utilisant [éq 3.2.6-2] donne :

$$\frac{dp_{vp}}{\rho_{vp}} = \frac{dp_w}{\rho_w} + (h_{vp}^m - h_w^m) \frac{dT}{T} \quad \text{éq 3.2.6-3}$$

Cette relation peut être exprimée en fonction de la pression capillaire et de la pression de gaz :

$$dp_{vp} = \frac{\rho_{vp}}{\rho_w} (dp_{gz} - dp_c - dp_{ad}) + \rho_{vp} (h_{vp}^m - h_w^m) \frac{dT}{T} \quad \text{éq 3.2.6-4}$$

3.2.7 Équilibre air sec-air dissous

L'air dissous se définit via la constante de Henry K_H , qui relie la concentration molaire d'air dissous C_{ad}^{ol} (moles/m³) à la pression d'air sec :

$$C_{ad}^{ol} = \frac{P_{as}}{K_H} \quad \text{éq 3.2.7-1}$$

$$\text{avec } C_{ad}^{ol} = \frac{\rho_{ad}}{M_{ad}^{ol}} \quad \text{éq 3.2.7-2}$$

La masse molaire de l'air dissous, M_{ad}^{ol} est logiquement la même que celle de l'air sec M_{as}^{ol} . Pour l'air dissous, on prend la loi des gaz parfait :

$$\frac{P_{ad}}{\rho_{ad}} = \frac{R}{M_{as}^{ol}} T \quad \text{éq 3.2.7-3}$$

La pression d'air dissous est donc liée à celle d'air sec par :

$$P_{ad} = \frac{P_{as}}{K_H} RT \quad \text{éq 3.2.7-4}$$

3.2.8 Le comportement mécanique

On l'écrira sous forme différentielle :

$$d\sigma = d\sigma' + d\sigma_p \mathbf{I} \quad \text{éq 3.2.8-1}$$

En utilisant une formulation de Bishop [bib10] élargie aux milieux non saturés on écrit :

$$d\sigma_p = -b(dp_{gz} - S_{lq} dp_c) \quad \text{éq 3.2.8-2}$$

Dans la relation [éq 3.2.8-1] l'évolution du tenseur de contrainte effective σ' est supposée ne dépendre que du déplacement du squelette et des variables internes α . Les termes habituels liés à la déformation thermique sont intégrés au calcul de la contrainte effective :

$$d \sigma' = f(d \varepsilon - \alpha_0 dT \mathbf{I}, d \alpha) \quad \text{éq 3.2.8-3}$$

La raison de ce choix est de pouvoir utiliser n'importe quelle loi de thermomécanique classique pour le calcul des contraintes effectives, lois qui, dans la plus part des écritures sont conformes à [éq 3.2.8-3].

3.2.9 Précisions sur les termes de transferts diphasiques

3.2.9.1 L'isotherme de sorption

Pour fermer le système, il reste encore une relation à écrire, reliant la saturation et les pressions. Nous avons choisi de considérer que la saturation en liquide était une fonction quelconque de la pression capillaire, que cette fonction était une caractéristique du milieu poreux et fournie en donnée par l'utilisateur.

Etant donné que l'utilisateur peut très bien fournir une fonction $S_{lq}(p_c)$ affine par morceaux, et étant donné que la dérivée de cette fonction, $\frac{\partial S_{lq}}{\partial p_c}$, joue un rôle physique essentiel, nous avons choisi de

demander à l'utilisateur de fournir également cette courbe, restant à sa charge de s'assurer de la cohérence des données ainsi spécifiées. Il existe cependant pour l'utilisateur la possibilité de faire appel à un modèle analytique de saturation et sa dérivée codé « en dur » dans le source : le modèle de Mualem-Van Genuchten (voir section suivante).

On remarque que dans l'approche présente, on parle d'un relation biunivoque entre saturation et pression capillaire. On sait que pour la plupart des milieux poreux, ce n'est pas la même relation qui doit être utilisée pour les chemins de séchage et pour les chemins d'hydratation. C'est une des limites de l'approche présente.

3.2.9.2 Le modèle Mualem - Van Genuchten

Concernant le comportement hydraulique, l'utilisateur dispose actuellement de deux choix : rentrer manuellement, et sous forme tabulée, perméabilités relatives, lois de saturation et leur dérivées en s'assurant de leur cohérence (mot clé HYDR_UTIL sous RELATION_KIT), soit de faire appel à un modèle connu et programmé sous forme analytique : le modèle Mualem - Van Genuchten (mot clé HYDR_VGM ou HYDR_VGC sous RELATION_KIT).

Remarque :

Il existe bien sur d'autres modèles classiques pour décrire le comportement hydraulique (Brook Corey par exemple) mais il ne sont actuellement pas disponibles dans Aster. C'est alors à l'utilisateur de les rentrer sous forme tabulée dans le fichier de commande. Le modèle Mualem-Van Genuchten est un modèle classique pour la description des matériaux argileux typiques des problèmes de stockage sous terrain. Pour la perméabilité relative au gaz, il est courant d'utiliser soit une version Van Genuchten, soit une version cubique.

Le modèle Mualem-Van Genuchten se traduit par une loi saturation/pression capillaire (Van Genuchten) telle que :

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

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

n , S_{wr} (saturation résiduelle en eau) et P_r sont des paramètres du modèles renseignés par l'utilisateur dans son fichier de commande.

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 dans le cas du modèle HYDR_VGM :

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

ou bien par une simple loi cubique dans le cas du HYDR_VGC :

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

Dans Code_Aster, nous faisons un traitement numérique de ce modèle dans les zones « limites » ($S=1$ ou $S=0$). Pour cela nous utilisons deux paramètres supplémentaires correspondant à un traitement que l'on effectue sur ces courbes, S_{max} et $CSAT$:

Pour $S > S_{max}$, ces courbes sont interpolées par un polynôme de degré 2 CI en S_{max} , 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 pour le cas HYDR_VGM $\frac{\partial k_r^{gz}(S)}{\partial S} = \infty$

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

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

Pour $S = S_{max}$, on détermine le polynôme $PL(S)$ tel que :

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

Pour $S > S_{max}$, $k_r^w(S)$ est remplacé par $PL(S)$.

Et pour $k_r^{gz}(S)$ dans le cas HYDR_VGM :

Pour $S = S_{max}$, on détermine le polynôme $PG(S)$ tel que :

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

Pour $S > S_{max}$, $k_r^{gz}(S)$ est remplacé par $PG(S)$.

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

Pour $S > S_{max}$:

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

avec A et B tels que la courbe soit CI en $Smax$.

On a donc bien une courbe décroissante qui tend vers 1 quand Pc tend vers $-\infty$. Ce traitement nous permet de gérer des pressions capillaires négatives (dans ces zones là le termes de pression capillaire est abusif, il s'agit implicitement d'un changement de variable permettant de traiter un problème quasi-saturé).

$S(Pc)$ 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). On conseille de prendre une valeur de $CSAT$ très proche de 1 (0,999999 par exemple).

3.2.10 Récapitulatif des caractéristiques du matériau et des données utilisateur

- Le module de Young E_0 et le coefficient de poisson drainés ν_0 permettent de calculer le module de compressibilité drainé du milieu poreux par $K_0 = \frac{E_0}{3(1-2\nu_0)}$,
- le coefficient de Biot $b = 1 - \frac{K_0}{K_s}$ permet de calculer le module de compressibilité des grains solides K_s ,
- le module de compressibilité de l'eau K_w ,
- le coefficient de dilatation de l'eau α_w ,
- la constante des gaz parfaits R ,
- la masse molaire de la vapeur M_{vp}^{ol} ,
- la masse molaire de l'air sec $M_{as}^{ol} (= M_{ad}^{ol})$,
- la chaleur massique à pression constante de l'eau C_w^p ,
- la chaleur massique à pression constante de l'air dissous C_{ad}^p ,
- la chaleur massique à pression constante de l'air sec C_{as}^p ,
- la chaleur massique à pression constante de la vapeur C_{vp}^p ,
- le coefficient de dilatation du milieu poreux α_0 qui est aussi celui des grains solides,
- la chaleur massique à contrainte constante des grains solides C_σ^s ,
- le coefficient de conductivité thermique des grains solides seuls, λ_s^T , fonction quelconque de la température,
- le coefficient de conductivité thermique du liquide, λ_{lq}^T , fonction quelconque de la température,
- le coefficient de conductivité thermique de l'air sec, λ_{as}^T , fonction quelconque de la température,
- le coefficient de diffusion de Fick pour le mélange gazeux, F_{vp} , fonction quelconque de la température, de la pression de gaz, de la pression de vapeur et de la saturation
- le coefficient de diffusion de Fick pour le mélange liquide, F_{ad} , fonction quelconque de la température et de la pression de liquide, de la pression de l'air dissous et de la saturation.
- La constante de Henry K_H fonction quelconque de la température,
- la perméabilité intrinsèque, K^{int} , fonction quelconque de la porosité,
- la viscosité dynamique de l'eau, μ_w , fonction quelconque de la température,
- la viscosité dynamique du gaz, μ_{gz} , fonction quelconque de la température,
- la perméabilité relative au liquide, k_{lq}^{rel} , fonction quelconque de la saturation en liquide,
- la perméabilité relative au gaz, k_{gz}^{rel} , fonction quelconque de la saturation en liquide et de la pression de gaz,

- la relation saturation/pression capillaire, $S_{lq}(p_c)$, fonction quelconque de la pression capillaire,
- de façon générale l'état initial est caractérisé par :
 - la température initiale,
 - les pressions initiales d'où l'on déduit la saturation initiale $S_{lq}^0(p_c)$,
 - la masse spécifique initiale de l'eau ρ_w^0 ,
 - la porosité initiale φ^0 ,
 - la pression initiale de la vapeur p_{vp}^0 d'où l'on déduit la masse volumique initiale de la vapeur ρ_{vp}^0 ,
 - la pression initiale de l'air sec p_{as}^0 d'où l'on déduit la masse volumique initiale de l'air sec ρ_{as}^0 .
 - la masse volumique initiale homogénéisée du milieu poreux r_0 ,
 - les enthalpies initiales du l'eau, de l'air dissous, de la vapeur et de l'air sec.

3.3 L'état de référence et l'état initial

L'introduction des conditions initiales est très importante, notamment 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. Bien souvent on prendra pour les pressions d'eau et d'air la pression atmosphérique. Dans cet état de référence, on peut considérer que les enthalpies sont nulles,
- l'état initial : il est important de noter que, à l'état initial du milieu poreux, l'eau est dans un état hygroscopique différent de celui de l'eau libre. Pour les enthalpies de l'eau et de la vapeur on devra prendre :

$${}^{init} h_w^m = \frac{p_w^{init} - p_l^{ref}}{\rho_w} = \frac{p_w^{init} - p_{atm}}{\rho_w}$$

$${}^{init} h_{vp}^m = L(T^{init}) = \text{chaleur latente de vaporisation}$$

$${}^{init} h_{as}^m = 0$$

$${}^{init} h_{ad}^m = 0$$

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_{vp}^{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 :

$p_{vp}^{sat}(T_0) = 10^{\left(2.7858 + \frac{T_0 - 273.5}{31.559 + .1354(T_0 - 273.5)} \right)}$, et un degré d'hygrométrie HR , on en déduit la pression de vapeur grâce à $p_{vp}(T_0) = HR p_{vp}^{sat}(T_0)$.

3.4 Inconnues nodales, valeurs initiales et valeurs de référence

Nous abordons ici un point qui tient plus à des choix de programmation qu'à de véritables aspects de formulation. Néanmoins, nous l'exposons parce qu'il a des conséquences pratiques importantes. Les inconnues principales qui sont aussi les valeurs des degrés de liberté, sont notées :

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

Selon la modélisation, elles peuvent avoir des significations différentes :

| | LIQU_SATU | LIQU_VAPE | LIQU_GAZ_ATM | GAZ | LIQU_VAPE_GAZ |
|------|-----------|-----------|--------------|----------|----------------------|
| PRE1 | p_w | p_w | $p_c = -p_w$ | p_{gz} | $p_c = p_{gz} - p_w$ |
| PRE2 | | | | | p_{gz} |

| | LIQU_GAZ | LIQU_AD_GAZ_VAPE | LIQU_AD_GAZ |
|------|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| PRE1 | $p_c = p_{gz} - p_w$ | $p_c = p_{gz} - p_w - p_{ad}$ | $p_c = p_{gz} - p_w - p_{ad}$ |
| PRE2 | p_{gz} | p_{gz} | p_{gz} |

On définira alors les pressions réelles et la température réelle par :

$p = p^{ddl} + p^{init}$ pour les pressions PRE1 et PRE2 et $T = T^{ddl} + T^{init}$ pour les températures, où p^{init} et T^{init} sont définis sous le mot clé THM_INIT de la commande DEFI_MATERIAU.

Les valeurs écrites par IMPR_RESU sont les valeurs de $\{u\}^{ddl}$. Les conditions aux limites sont définies pour $\{u\}^{ddl}$. 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 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. Les pressions réelles et la température réelle sont utilisées dans les lois de comportement, notamment les lois du type $S_{iq} = f(p_c)$ ou $\frac{dp}{p} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dT}{T}$. 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 $u = u^{ddl} + u^{init}$ 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.

3.5 Contraintes effectives et contraintes totales. Conditions aux limites de contrainte

La partition des contraintes en contraintes totale et effective s'écrit :

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

σ est la contrainte totale, c'est-à-dire celle qui vérifie : $\text{Div}(\sigma) + r \mathbf{F}^m = \mathbf{0}$

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

σ_p se calcule en fonction des pressions hydrauliques. L'écriture adoptée est incrémentale et, si l'on veut que la valeur de σ_p soit cohérente avec la valeur p^{init} définie sous le mot clé THM_INIT, il faut initialiser σ_p par le mot clé SIGM du mot clé facteur ETAT_INIT de la commande STAT_NON_LINE.

Dans les fichiers résultats, on trouve les contraintes effectives σ' sous les noms de composantes SIXX ... et σ_p sous le nom SIP. Les conditions aux limites en contraintes sont écrites en contraintes totales.

3.6 Quelques valeurs numériques

Nous donnons ici quelques valeurs raisonnables pour certains coefficients. Ces valeurs ne sont pas programmées dans Code_Aster, elles sont fournies ici à titre indicatif :

Pour les gaz parfaits, on retient les valeurs suivantes :

$$R = 8.3144 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$M_{vp}^{ol} = 18.10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mole}^{-1}$$

$$M_{as}^{ol} = 28.9610^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mole}^{-1}$$

Pour le CO₂, la valeur de la constante de Henry à 20 °C est de :

$$K_H = 3162 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \text{ mole}^{-1}$$

Pour l'eau liquide, on a :

$$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$K_w = 2000 \text{ MPa}$$

Le coefficient de dilatation thermique de l'eau est correctement approché par la formule :

$$\alpha_w = 9.52 \cdot 10^{-5} \ln(T - 273) - 2.19 \cdot 10^{-4} \text{ (K}^{-1}\text{)}$$

Les capacités calorifiques ont pour valeurs :

$$C_{\sigma}^s = 800 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$C_{lq}^p = 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$C_{vp}^p = 1870 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$C_{as}^p = 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

On donne également une loi d'évolution de la chaleur latente de changement de phase liquide vapeur :

$$L(T) = 2500800 - 2443(T - 273.15) \text{ J/kg}$$

4 Calcul des contraintes généralisées

Dans ce chapitre, nous précisons comment sont intégrées les relations décrites au chapitre 3. Plus précisément encore, nous donnons les expressions des contraintes généralisées au sens du document [R7.01.10] [bib4] quand les lois de comportements THM sont appelées pour l'option RAPH_MECA au

sens du document [R5.03.01] [bib3]. Afin que ce document suive de plus près l'ordre de programmation, nous allons considérer deux cas : le cas sans air dissous et celui avec.

Les contraintes généralisées sont :

$$\boldsymbol{\sigma}', \sigma_p; m_w, \mathbf{M}_w, h_w^m; m_{vp}, \mathbf{M}_{vp}, h_{vp}^m; m_{as}, \mathbf{M}_{as}, h_{as}^m; m_{ad}, \mathbf{M}_{ad}, h_{ad}^m; Q', \mathbf{q}$$

Les déformations généralisées, à partir desquelles on calcule les contraintes généralisées sont :

$$\mathbf{u}, \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}); p_c, \nabla p_c; p_{gz}, \nabla p_{gz}; T, \nabla T$$

Les variables internes que nous avons retenues sont :

- Dans le cas sans vapeur :

$$\varphi, \rho_w, S_{lq}$$

- Dans le cas avec vapeur et sans air dissous :

$$\varphi, \rho_w, p_{vp}, S_{lq}$$

- Dans le cas avec vapeur et air dissous :

$$\varphi, \rho_w, p_{vp}, p_{ad}, S_{lq}$$

Dans ce chapitre, nous adoptons les notations habituelles Aster, à savoir les indices + pour les valeurs des quantités en fin de pas de temps et les indices - pour les quantités au début du pas de temps.

Ainsi, les quantités connues sont :

- les contraintes, déformations généralisées et variables internes au début du pas de temps :
 - $\boldsymbol{\sigma}'^-, \sigma_p^-; m_w^-, \mathbf{M}_w^-, h_w^m^-; m_{vp}^-, \mathbf{M}_{vp}^-, h_{vp}^m^-; m_{as}^-, \mathbf{M}_{as}^-, h_{as}^m^-; m_{ad}^-, \mathbf{M}_{ad}^-, h_{ad}^m^-; Q'^-, \mathbf{q}^-$
 - $\mathbf{u}^-, \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}^-); p_c^-, \nabla p_c^-; p_{gz}^-, \nabla p_{gz}^-; T^-, \nabla T^-$
 - $\varphi^-, \rho_w^-, p_{vp}^-, p_{ad}^-$
- les déformations généralisées à la fin du pas de temps :
 - $\mathbf{u}^+, \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}^+); p_c^+, \nabla p_c^+; p_{gz}^+, \nabla p_{gz}^+; T^+, \nabla T^+$
- Les quantités inconnues sont les contraintes, et variables internes à la fin du pas de temps :
 - $\boldsymbol{\sigma}'^+, \sigma_p^+; m_w^+, \mathbf{M}_w^+, h_w^m^+; m_{vp}^+, \mathbf{M}_{vp}^+, h_{vp}^m^+; m_{as}^+, \mathbf{M}_{as}^+, h_{as}^m^+; m_{ad}^+, \mathbf{M}_{ad}^+, h_{ad}^m^+; Q'^+, \mathbf{q}^+$
 - $\varphi^+, \rho_w^+, p_{vp}^+, p_{ad}^+$

4.1 Cas sans air dissous

4.1.1 Calcul de la porosité et de la masse volumique du fluide

La première chose à faire est bien sûr de calculer la saturation à la fin du pas de temps $S_{lq}^+ = S_{lq}(p_c^+)$. La porosité se trouve en intégrant sur le pas de temps l'équation [éq 3.2.1-1].

On obtient alors :

$$\ln \left\{ \frac{b - \varphi^+}{b - \varphi^-} \right\} = \left\{ -(\varepsilon_v^+ - \varepsilon_v^-) + 3\alpha_0(T^+ - T^-) - \frac{(p_{gz}^+ - p_{gz}^-) - S_{lq}^+(p_c^+ - p_c^-)}{K_s} \right\} \quad \text{éq 4.1.1-1}$$

La masse volumique du liquide se trouve en intégrant sur le pas de temps l'équation [éq 3.2.3.1-1].

Ce qui donne :

$$\ln\left(\frac{\rho_w^+}{\rho_w^-}\right) = \frac{p_{gz}^+ - p_{gz}^- - p_c^+ + p_c^-}{K_w} - 3\alpha_w(T^+ - T^-) \quad \text{éq 4.1.1-2}$$

4.1.2 Calcul des coefficients de dilatation

Il s'agit d'une simple application des formules [éq 3.2.4.3-2] et [éq 3.2.4.3-3], lesquelles sont évaluées en fin de pas de temps :

$$\alpha_{vp}^{m^+} = \alpha_{as}^{m^+} = \alpha_{gz}^{m^+} = (1 - S_{lq}^+)(b - \varphi^+) \alpha_0 + \frac{\varphi^+(1 - S_{lq}^+)}{3T^+} \quad \text{éq 4.1.2-1}$$

$$\alpha_w^{m^+} = S_{lq}^+(b - \varphi^+) \alpha_0 + \alpha_{lq} \varphi^+ S_{lq}^+ \quad \text{éq 4.1.2-2}$$

4.1.3 Calcul des enthalpies fluides

Les enthalpies fluides sont calculées par intégration des équations [éq 3.2.4.1-1], [éq 3.2.4.2-1], [éq 3.2.4.2-2].

$$h_w^{m^+} = h_w^{m^-} + C_w^p(T^+ - T^-) + \frac{(1 - 3\alpha_w T^+)}{\rho_w^+} (p_{gz}^+ - p_{gz}^- - p_c^+ + p_c^-) \quad \text{éq 4.1.3-1}$$

$$h_{vp}^{m^+} = h_{vp}^{m^-} + C_{vp}^p(T^+ - T^-) \quad \text{éq 4.1.3-2}$$

$$h_{as}^{m^+} = h_{as}^{m^-} + C_{as}^p(T^+ - T^-) \quad \text{éq 4.1.3-3}$$

4.1.4 Pressions de vapeur et d'air

Partant de la relation [éq 3.2.6-4] dans laquelle on porte la loi de comportement des gaz parfaits [éq 3.2.3.2-1], on trouve $\frac{dp_{vp}}{p_{vp}} = \frac{M_{vp}^{ol}}{RT} \left(\frac{1}{\rho_w} dp_{gz} - \frac{1}{\rho_w} dp_c + (h_{vp}^m - h_w^m) \frac{dT}{T} \right)$ que l'on intègre par un chemin d'abord à température constante (on considère alors la masse volumique de l'eau constante), puis de T^- à T^+ à pressions constantes.

$$\ln\left(\frac{p_{vp}^+}{p_{vp}^-}\right) = \frac{M_{vp}^{ol}}{RT^+} \frac{1}{\rho_w^+} \left[(p_{gz}^+ - p_{gz}^-) - (p_c^+ - p_c^-) \right] + \frac{M_{vp}^{ol}}{R} \int_{T^-}^{T^+} (h_{vp}^m - h_w^m) \frac{dT}{T^2}$$

Le premier terme correspond au chemin à température constante, le second au chemin à pressions constantes. En utilisant les définitions [éq 3.2.4.1-1] et [éq 3.2.4.2-1] des enthalpies, on voit que pour une évolution à pressions constantes :

$$\frac{h_{vp}^m - h_w^m}{T^2} = \frac{h_{vp}^{m^-} - h_w^{m^-}}{T^2} + \frac{(C_{vp}^p - C_w^p)(T - T^-)}{T^2}$$

On a donc pour un tel chemin :

$$\int_{T^-}^{T^+} (h_{vp}^m - h_w^m) \frac{dT}{T^2} = (h_{vp}^{m^-} - h_w^{m^-}) \left(\frac{1}{T^-} - \frac{1}{T^+} \right) + (C_{vp}^p - C_w^p) \left(\ln\left(\frac{T^+}{T^-}\right) + T^- \left(\frac{1}{T^+} - \frac{1}{T^-} \right) \right)$$

Soit finalement :

$$\ln\left(\frac{p_{vp}^+}{p_{vp}^-}\right) = \frac{M_{vp}^{ol}}{RT^+} \frac{1}{\rho_w^+} \left[(p_{gz^+} - p_{gz}^-) - (p_{c^+} - p_{c^-}) \right] + \frac{M_{vp}^{ol}}{R} (h_{vp}^{m^+} - h_w^{m^+}) \left(\frac{1}{T^-} - \frac{1}{T^+} \right) + \frac{M_{vp}^{ol}}{R} (C_{vp}^p - C_w^p) \left(\ln\left(\frac{T^+}{T^-}\right) + \frac{T^-}{T^+} - 1 \right) \quad \text{éq 4.1.4-1}$$

On peut alors calculer les masses volumiques de la vapeur et de l'air par les relations [éq 3.2.3.2-1] et [éq 3.2.3.2-2] :

$$\rho_{vp}^+ = \frac{M_{vp}^{ol}}{R} \frac{p_{vp}^+}{T^+} \quad \text{éq 4.1.4-2}$$

$$\rho_{as}^+ = \frac{M_{as}^{ol}}{R} \frac{(p_{gz^+} - p_{vp}^+)}{T^+} \quad \text{éq 4.1.4-3}$$

4.1.5 Calcul des apports massiques

Les équations [éq 3.2.2-1] donnent des apports massiques nuls à l'instant 0. On écrit de façon incrémentale les équations [éq 3.2.2-1] :

$$\begin{aligned} m_w^+ &= m_w^- + \rho_w^+ (1 + \varepsilon_V^+) \varphi^+ S_{lq}^+ - \rho_w^- (1 + \varepsilon_V^-) \varphi^- S_{lq}^- \\ m_{as}^+ &= m_{as}^- + \rho_{as}^+ (1 + \varepsilon_V^+) \varphi^+ (1 - S_{lq}^+) - \rho_{as}^- (1 + \varepsilon_V^-) \varphi^- (1 - S_{lq}^-) \\ m_{vp}^+ &= m_{vp}^- + \rho_{vp}^+ (1 + \varepsilon_V^+) \varphi^+ (1 - S_{lq}^+) - \rho_{vp}^- (1 + \varepsilon_V^-) \varphi^- (1 - S_{lq}^-) \end{aligned} \quad \text{éq 4.1.5-1}$$

4.1.6 Calcul de la capacité calorifique et de la chaleur Q'

On a maintenant tous les éléments pour appliquer à la fin du pas de temps la formule [éq 3.2.4.3-5] :

$$C_\sigma^{0+} = (1 - \varphi^+) \rho_s C_\sigma^s + S_{lq}^+ \varphi^+ \rho_w^+ C_w^p + (1 - S_{lq}^+) \varphi^+ (\rho_{vp}^+ C_{vp}^p + \rho_{as}^+ C_{as}^p) \quad \text{éq 4.1.6-1}$$

On utilise bien sûr [éq 3.2.4.3-4] qui donne :

$$C_\varepsilon^{0+} = C_\sigma^{0+} - 9 T^+ K_0 \alpha_0^2 \quad \text{éq 4.1.6-2}$$

Bien que la variation de chaleur $\delta Q'$ ne soit pas une différentielle totale, il est néanmoins licite de l'intégrer sur le pas de temps et on obtient en intégrant [éq 3.2.4.3-1].

$$Q'^+ = Q'^- + 3 \alpha_0 K_0 T^{1/2} (\varepsilon_V^+ - \varepsilon_V^-) + 3 \alpha_{lq}^{m^+} T^{1/2} (p_{c^+} - p_{c^-}) - (3 \alpha_{gz^+}^{m^+} + 3 \alpha_{lq}^{m^+}) T^{1/2} (p_{gz^+} - p_{gz^-}) + C_\varepsilon^{0+} (T^+ - T^-) \quad \text{éq 4.1.6-3}$$

où nous avons noté : $T^{1/2} = \frac{T^+ + T^-}{2}$. Nous avons choisi ici une formule de « point milieu » pour la variable température.

4.1.7 Calcul des contraintes mécaniques

Le calcul des contraintes effectives se fait en invoquant les lois incrémentales de mécanique choisies par l'utilisateur. On intègre sur le pas de temps [éq 3.2.8-2] et on a :

$$\sigma_p^+ = \sigma_p^- - b(p_{gz}^+ - p_{gz}^-) + b S_{lq}^+ (p_c^+ - p_c^-) \quad \text{éq 4.1.7-1}$$

4.1.8 Calcul des flux hydriques et thermiques

Il faut bien sûr calculer tous les coefficients de diffusion :

- Le coefficient de Fick $F^+ = F(T^+, p_c^+, p_{gz}^+)$
- La diffusivité thermique $\lambda^{T^+} = \lambda_\phi^T(\varphi^+) \cdot \lambda_S^T(S_{lq}^+) \cdot \lambda_T^T(T^+) + \lambda_{cte}^T$
- Les perméabilités et conductivités hydrauliques :

$$\lambda_{lq}^{H^+} = \frac{K^{int}(\varphi^+) \cdot k_w^{rel}(S_{lq}^+)}{\mu_w(T^+)} \quad \lambda_{gz}^{H^+} = \frac{K^{int}(\varphi^+) \cdot k_{gz}^{rel}(S_{lq}^+, p_{gz}^+)}{\mu_{gz}(T^+)}$$

La concentration en vapeur : $C_{vp}^+ = \frac{p_{vp}^+}{p^+}$

Il ne reste plus alors qu'à appliquer les formules [éq 3.2.5.1-1], [éq 3.2.5.2-15], [éq 3.2.5.2-16] et [éq 3.2.5.2-17] pour trouver :

$$\mathbf{q}^+ = -\lambda^{T^+} \nabla T^+ \quad \text{éq 4.1.8-1}$$

$$\frac{\mathbf{M}_{as}^+}{\rho_{as}^+} = \lambda_{gz}^{H^+} \left[-\nabla p_{gz}^+ + (\rho_{as}^+ + \rho_{vp}^+) \mathbf{F}^m \right] + C_{vp}^+ F_{vp}^+ \nabla C_{vp}^+ \quad \text{éq 4.1.8-2}$$

$$\frac{\mathbf{M}_{vp}^+}{\rho_{vp}^+} = \lambda_{gz}^{H^+} \left[-\nabla p_{gz}^+ + (\rho_{as}^+ + \rho_{vp}^+) \mathbf{F}^m \right] - (1 - C_{vp}^+) F_{vp}^+ \nabla C_{vp}^+ \quad \text{éq 4.1.8-3}$$

$$\frac{\mathbf{M}_w^+}{\rho_w^+} = \lambda_{lq}^{H^+} \left[-\nabla p_{lq}^+ + \rho_w^+ \mathbf{F}^m \right] \quad \text{éq 4.1.8-4}$$

4.2 Cas avec air dissous

4.2.1 Calcul de la porosité

De la même manière, la première chose à faire est de calculer la saturation à la fin du pas de temps $S_{lq}^+ = S_{lq}(p_c^+)$. La porosité se trouve en intégrant sur le pas de temps l'équation [éq 3.2.1-1]. On rappelle donc que :

$$\ln \left(\frac{b - \varphi^+}{b - \varphi^-} \right) = \left(-(\varepsilon_v^+ - \varepsilon_v^-) + 3 \alpha_0 (T^+ - T^-) - \frac{(p_{gz}^+ - p_{gz}^-) - S_{lq}^+ (p_c^+ - p_c^-)}{K_S} \right)$$

4.2.2 Calcul des coefficients de dilatation

Il s'agit d'une simple application des formules [éq 3.2.4.3-2] et [éq 3.2.4.3-3], lesquelles sont évaluées en fin de pas de temps :

$$\alpha_{vp}^{m^+} = \alpha_{as}^{m^+} = \alpha_{gz}^{m^+} = (1 - S_{lq}^+) (b - \varphi^+) \alpha_0 + \frac{\varphi^+ (1 - S_{lq}^+)}{3 T^+} \quad \text{éq 4.2.2-1}$$

$$\alpha_w^m = S_{lq}^+ (b - \varphi^+) \alpha_0 + \alpha_{lq} \varphi^+ S_{lq}^+ \quad \text{éq 4.2.2-2}$$

$$\alpha_{ad}^{m^+} = S_{lq}^+ (b - \varphi^+) \alpha_0 + \frac{\varphi^+ S_{lq}^+}{3 T^+} \quad \text{éq 4.2.2-3}$$

4.2.3 Calcul des pressions de vapeur, d'air dissous et sec et des masses volumiques

Partant de la relation [éq 3.2.6-4] dans laquelle on porte la loi de comportement des gaz parfaits [éq 3.2.3.2-1], on trouve :

$$\frac{dp_{vp}}{p_{vp}} = \frac{M_{vp}^{ol}}{RT} \left(\frac{1}{\rho_w} dp_w + (h_{vp}^m - h_w^m) \frac{dT}{T} \right) \quad \text{éq 4.2.3-1}$$

Contrairement au cas sans air dissous p_w n'est maintenant plus connu :

$$p_w = p_{lq} - p_{ad} = p_{gz} - p_c - \frac{RT}{K_H} p_{as} = p_{gz} - p_c - \frac{RT}{K_H} (p_{gz} - p_{vp})$$

donc :

$$dp_w = dp_{gz} - dp_c - \frac{RT}{K_H} (dp_{gz} - dp_{vp}) - \frac{R}{K_H} (p_{gz} - p_{vp}) dT \quad \text{éq 4.2.3-2}$$

On intègre [éq 4.2.3.1] en y incluant [éq 4.2.3.2] par un chemin d'abord à température constante (on considère alors la masse volumique de l'eau constante), puis de T^- à T^+ à pressions constantes. Au final on obtient :

$$\ln \left(\frac{p_{vp}^+}{p_{vp}^-} \right) = \frac{M_{vp}^{ol}}{\rho_w^-} \left(\frac{1}{RT^+} - \frac{1}{K_H} \right) (p_{gz}^+ - p_{gz}^-) + \frac{M_{vp}^{ol}}{\rho_w^- K_H} (p_{vp}^+ - p_{vp}^-) - \frac{M_{vp}^{ol}}{\rho_w^- RT^+} (p_c^+ - p_c^-) + \frac{M_{vp}^{ol} R}{\rho_w^- K_H} (p_{vp}^+ - p_{gz}^+) \ln \left(\frac{T^+}{T^-} \right) + \frac{M_{vp}^{ol}}{R} \int_{T^-}^{T^+} (h_{vp}^m - h_w^m) \frac{dT}{T^2} \quad \text{éq 4.2.3-3}$$

Contrairement au cas précédent, on a ici une équation non linéaire à résoudre. On va faire pour ça une méthode de type correcteur-prédicteur. On pose \tilde{p}_{vp} tel que :

$$\ln\left(\frac{\tilde{p}_{vp}}{p_{vp}^-}\right) = \frac{M_{vp}^{ol}}{\rho_w^-} \left(\frac{1}{RT^+} - \frac{1}{K_H}\right) (p_{gz^+} - p_{gz}^-) - \frac{M_{vp}^{ol}}{\rho_w^- RT^+} (p_{c^+} - p_c^-) + \frac{M_{vp}^{ol}}{R} \int_{T^-}^{T^+} (h_{vp}^m - h_w^m) \frac{dT}{T^2}$$

éq 4.2.3-4

et donc

$$\tilde{p}_{vp} = p_{vp}^- \cdot \exp\left(\frac{M_{vp}^{ol}}{\rho_w^-} \left(\frac{1}{RT^+} - \frac{1}{K_H}\right) (p_{gz^+} - p_{gz}^-) - \frac{M_{vp}^{ol}}{\rho_w^- RT^+} (p_{c^+} - p_c^-) + \int_{T^-}^{T^+} (h_{vp}^m - h_w^m) \frac{dT}{T^2}\right)$$

éq 4.2.3-5

En outre, comme dans la section [§4.1.4], on rappelle que :

$$\int_{T^-}^{T^+} (h_{vp}^m - h_w^m) \frac{dT}{T^2} = (h_{vp}^m - h_w^m) \left(\frac{1}{T^-} - \frac{1}{T^+}\right) + (C_{vp}^p - C_w^p) \left(\ln\left(\frac{T^+}{T^-}\right) + T^- \left(\frac{1}{T^+} - \frac{1}{T^-}\right)\right)$$

Comme $\ln\left(\frac{p_{vp}^+}{p_{vp}^-}\right) = \ln\left(\frac{\tilde{p}_{vp}}{p_{vp}^-}\right) + \ln\left(\frac{p_{vp}^+}{\tilde{p}_{vp}}\right)$ et que par D.L. $\ln\left(\frac{p_{vp}^+}{\tilde{p}_{vp}}\right) = \ln\left(1 + \frac{p_{vp}^+ - \tilde{p}_{vp}}{\tilde{p}_{vp}}\right) \approx \frac{p_{vp}^+ - \tilde{p}_{vp}}{\tilde{p}_{vp}}$,

p_{vp}^+ sera donc donné par l'expression linéaire suivante :

$$\frac{p_{vp}^+}{\tilde{p}_{vp}} = 1 + \frac{M_{vp}^{ol}}{\rho_w^- K_H} (p_{vp}^+ - p_{vp}^-) + \frac{M_{vp}^{ol} R}{\rho_w^- K_H} (p_{vp}^+ - p_{gz}^-) \ln\left(\frac{T^+}{T^-}\right)$$

éq 4.2.3-6

d'où

$$p_{vp}^+ = \frac{\left(\rho_w^- K_H - M_{vp}^{ol} \left(p_{vp}^- + p_{gz}^- R \ln\left(\frac{T^+}{T^-}\right)\right)\right)}{\left(\frac{\rho_w^- K_H}{\tilde{p}_{vp}} - M_{vp}^{ol} \left(1 + R \ln\left(\frac{T^+}{T^-}\right)\right)\right)}$$

éq 4.2.3-7

A partir de là les autres pressions se calculent facilement :

$$p_{as}^+ = p_{gz}^+ - p_{vp}^+$$

$$p_{ad}^+ = \frac{p_{as}^+}{K_H} RT^+$$

$$p_w^+ = p_{gz}^+ - p_c^+ - p_{ad}^+$$

On peut alors calculer les masses volumiques de la vapeur et de l'air par les relations [éq 3.2.3.2-1], [éq 3.2.3.2-2] et [éq 3.2.7-3] :

$$\rho_{vp}^+ = \frac{M_{vp}^{ol} P_{vp}^+}{R T^+} \quad \text{éq 4.2.3-8}$$

$$\rho_{as}^+ = \frac{M_{as}^{ol} (P_{gz}^+ - P_{vp}^+)}{R T^+} \quad \text{éq 4.2.3-9}$$

$$\rho_{ad}^+ = \frac{P_{ad}^+ M_{as}^{ol}}{R T^+} \quad \text{éq 4.2.3-10}$$

La masse volumique de l'eau se trouve en intégrant sur le pas de temps l'équation [éq 3.2.3.1-1].

Ce qui donne :

$$\ln \left(\frac{\rho_w^+}{\rho_w^-} \right) = \frac{P_{gz}^+ - P_{gz}^- - P_c^+ + P_c^- - P_{ad}^+ + P_{ad}^-}{K_w} - 3 \alpha_w (T^+ - T^-) \quad \text{éq 4.2.3-11}$$

4.2.4 Calcul des enthalpies fluides

Les enthalpies fluides sont calculées par intégration des équations [éq 3.2.4.1-1], [éq 3.2.4.1-3], [éq 3.2.4.2-1], [éq 3.2.4.2-2].

$$h_w^m = h_w^m + C_w^p (T^+ - T^-) + \frac{(1 - 3 \alpha_w T^+)}{\rho_w^+} (P_{gz}^+ - P_{gz}^- - P_c^+ + P_c^- - P_{ad}^+ + P_{ad}^-) \quad \text{éq 4.2.4-1}$$

$$h_{ad}^m = h_{ad}^m + C_{ad}^p (T^+ - T^-) \quad \text{éq 4.2.4-2}$$

$$h_{vp}^m = h_{vp}^m + C_{vp}^p (T^+ - T^-) \quad \text{éq 4.2.4-3}$$

$$h_{as}^m = h_{as}^m + C_{as}^p (T^+ - T^-) \quad \text{éq 4.2.4-4}$$

4.2.5 Calcul des apports massiques

Les équations [éq 3.2.2-1] donnent des apports massiques nuls à l'instant 0. On écrit de façon incrémentale les équations [éq 3.2.2-1] :

$$\begin{aligned} m_w^+ &= m_w^- + \rho_w^+ (1 + \varepsilon_V^+) \varphi^+ S_{lq}^+ - \rho_w^- (1 + \varepsilon_V^-) \varphi^- S_{lq}^- \\ m_{ad}^+ &= m_{ad}^- + \rho_{ad}^+ (1 + \varepsilon_V^+) \varphi^+ S_{lq}^+ - \rho_{ad}^- (1 + \varepsilon_V^-) \varphi^- S_{lq}^- \\ m_{as}^+ &= m_{as}^- + \rho_{as}^+ (1 + \varepsilon_V^+) \varphi^+ (1 - S_{lq}^+) - \rho_{as}^- (1 + \varepsilon_V^-) \varphi^- (1 - S_{lq}^-) \\ m_{vp}^+ &= m_{vp}^- + \rho_{vp}^+ (1 + \varepsilon_V^+) \varphi^+ (1 - S_{lq}^+) - \rho_{vp}^- (1 + \varepsilon_V^-) \varphi^- (1 - S_{lq}^-) \end{aligned} \quad \text{éq 4.2.5-1}$$

4.2.6 Calcul de la capacité calorifique et de la chaleur Q'

On a maintenant tous les éléments pour appliquer à la fin du pas de temps la formule [éq 3.2.4.3-5] :

$$C_{\sigma}^{0+} = (1 - \varphi^+) \rho_s C_{\sigma}^s + S_{lq}^+ \varphi^+ (\rho_w C_w^p + \rho_{ad} C_{ad}^p) + (1 - S_{lq}^+) \varphi^+ (\rho_{vp} C_{vp}^p + \rho_{as} C_{as}^p) \quad \text{éq 4.2.6-1}$$

On utilise bien sûr [éq 3.2.4.3-4] qui donne :

$$C_{\varepsilon}^{0+} = C_{\sigma}^{0+} - 9 T^+ K_0 \alpha_0^2 \quad \text{éq 4.2.6-2}$$

Bien que la variation de chaleur $\delta Q'$ ne soit pas une différentielle totale, il est néanmoins licite de l'intégrer sur le pas de temps et on obtient en intégrant [éq 3.2.4.3-1].

$$Q'^+ = Q'^- + 3 \alpha_0 K_0 T^{1/2} (\varepsilon_V^+ - \varepsilon_V^-) + 3 \alpha_{lq}^{m+} T^{1/2} (p_c^+ - p_c^-) - (3 \alpha_{gz}^{m+} + 3 \alpha_{lq}^{m+}) T^{1/2} (p_{gz}^+ - p_{gz}^-) + C_{\varepsilon}^{0+} (T^+ - T^-) \quad \text{éq 4.2.6-3}$$

où nous avons noté : $T^{1/2} = \frac{T^+ + T^-}{2}$. Nous avons choisi ici une formule de « point milieu » pour la variable température.

4.2.7 Calcul des contraintes mécaniques

Le calcul des contraintes effectives se fait en invoquant les lois incrémentales de mécanique choisies par l'utilisateur. On intègre sur le pas de temps [éq 3.2.8-2] et on a :

$$\sigma_p^+ = \sigma_p^- - b (p_{gz}^+ - p_{gz}^-) + b S_{lq}^+ (p_c^+ - p_c^-) \quad \text{éq 4.2.7-1}$$

4.2.8 Calcul des flux hydriques et thermiques

Il faut bien sûr calculer tous les coefficients de diffusion :

Les coefficients de Fick $F_{vp}^+(P_{vp}^+, P_{gz}^+, T^+, S^+)$ et $F_{ad}^+(P_{ad}^+, P_{lq}^+, T^+, S^+)$

La diffusivité thermique $\lambda^{T+} = \lambda_{\varphi}^T(\varphi^+) \cdot \lambda_S^T(S_{lq}^+) \cdot \lambda_T^T(T^+) + \lambda_{cte}^T$

Les perméabilités et conductivités hydrauliques :

$$\lambda_{lq}^{H+} = \frac{K^{\text{int}}(\varphi^+) \cdot k_w^{\text{rel}}(S_{lq}^+)}{\mu_w(T^+)} ; \lambda_{gz}^{H+} = \frac{K^{\text{int}}(\varphi^+) \cdot k_{gz}^{\text{rel}}(S_{lq}^+, P_{gz}^+)}{\mu_{gz}(T^+)}$$

Les concentrations en vapeur et air dissous : $C_{vp}^+ = \frac{p_{vp}^+}{p_{gz}^+}$ et $C_{ad}^+ = \rho_{ad}^+$

Il ne reste plus alors qu'à appliquer les formules [éq 3.2.5.1-1], [éq 3.2.5.2-15], [éq 3.2.5.2-16], [éq 3.2.5.2-17] et [éq 3.2.5.2-18] pour trouver :

$$\mathbf{q}^+ = -\lambda^{T^+} \nabla T^+ \quad \text{éq 4.2.8-1}$$

$$\frac{\mathbf{M}_{as}^+}{\rho_{as}^+} = \lambda_{gz}^{H^+} \left[-\nabla p_{gz}^+ + (\rho_{as}^+ + rh\delta_{vp}^+) \mathbf{F}^m \right] + C_{vp}^+ F_{vp}^+ \nabla C_{vp}^+ \quad \text{éq 4.2.8-2}$$

$$\frac{\mathbf{M}_{vp}^+}{\rho_{vp}^+} = \lambda_{gz}^{H^+} \left[-\nabla p_{gz}^+ + (\rho_{as}^+ + \rho_{vp}^+) \mathbf{F}^m \right] - (1 - C_{vp}^+) F_{vp}^+ \nabla C_{vp}^+ \quad \text{éq 4.2.8-3}$$

$$\frac{\mathbf{M}_w^+}{\rho_w^+} = \lambda_{lq}^{H^+} \left[-\nabla p_{lq}^+ + (\rho_w^+ + \rho_{ad}^+) \mathbf{F}^m \right] \quad \text{éq 4.2.8-4}$$

$$\mathbf{M}_{ad}^+ = \rho_{ad}^+ \lambda_{lq}^{H^+} \left[-\nabla p_{lq}^+ + (\rho_w^+ + \rho_{ad}^+) \mathbf{F}^m \right] - F_{ad}^+ \nabla C_{ad}^+ \quad \text{éq 4.2.8-5}$$

5 Calcul des dérivées des contraintes généralisées

Dans ce chapitre, nous donnons les expressions des dérivées des contraintes généralisées par rapport aux déformations généralisées au sens du document [R7.01.10] [bib4], c'est-à-dire les termes qui sont calculés quand les lois de comportements THM sont appelées pour l'option RIGI_MECA_TANG au sens du document [R5.03.01] [bib3].

Afin de ne pas alourdir l'exposé, nous donnons l'expression des différentielles des contraintes généralisées, sachant que les dérivées partielles s'en déduisent directement.

5.1 Dérivées des contraintes

Le calcul de la différentielle des contraintes effectives est laissé à la charge de la loi de comportement purement mécanique, que nous ne décrivons pas dans ce document. La différentielle de la contrainte σ_p est donnée directement par l'expression [éq 3.2.8-2].

5.2 Dérivées des apports massiques

En différenciant [éq 3.2.2-1], on a :

$$\begin{aligned} \frac{dm_w}{\rho_w} &= \frac{d\rho_w}{\rho_w} (1 + \varepsilon_V) \varphi S_{lq} + d\varepsilon_V \varphi S_{lq} + (1 + \varepsilon_V) d\varphi S_{lq} + (1 + \varepsilon_V) \varphi dS_{lq} \\ \frac{dm_{ad}}{\rho_{ad}} &= \frac{d\rho_{ad}}{\rho_{ad}} (1 + \varepsilon_V) \varphi S_{lq} + d\varepsilon_V \varphi S_{lq} + (1 + \varepsilon_V) d\varphi S_{lq} + (1 + \varepsilon_V) \varphi dS_{lq} \\ \frac{dm_{as}}{\rho_{as}} &= \frac{d\rho_{as}}{\rho_{as}} (1 + \varepsilon_V) \varphi (1 - S_{lq}) + d\varepsilon_V \varphi (1 - S_{lq}) + (1 + \varepsilon_V) d\varphi (1 - S_{lq}) - (1 + \varepsilon_V) \varphi dS_{lq} \\ \frac{dm_{vp}}{\rho_{vp}} &= \frac{d\rho_{vp}}{\rho_{vp}} (1 + \varepsilon_V) \varphi (1 - S_{lq}) + d\varepsilon_V \varphi (1 - S_{lq}) + (1 + \varepsilon_V) d\varphi (1 - S_{lq}) - (1 + \varepsilon_V) \varphi dS_{lq} \end{aligned} \quad \text{éq 5.2-1}$$

5.2.1 Cas sans air dissous

en tenant compte de [éq 3.2.1-1] et de [éq 3.2.3.1-1], [éq 3.2.3.2-1], [éq 3.2.3.2-2] et en supposant $1 + \varepsilon_V \approx 1$ on trouve :

$$\left. \begin{aligned} \frac{dm_w}{\rho_w} &= b S_{lq} d\varepsilon_V + \left(\varphi \frac{\partial S_{lq}}{\partial P_c} - \frac{S_{lq} \varphi}{K_w} - \frac{S_{lq}^2 (b - \varphi)}{K_s} \right) dp_c + S_{lq} \left(\frac{\varphi}{K_w} + \frac{(b - \varphi)}{K_s} \right) dp_{gz} - 3 \alpha_w^m dT \\ \frac{dm_{vp}}{\rho_{vp}} &= b (1 - S_{lq}) d\varepsilon_V + \left(-\varphi \frac{\partial S_{lq}}{\partial P_c} - \frac{(1 - S_{lq}) S_{lq} (b - \varphi)}{K_s} \right) dp_c + \left(\frac{(b - \varphi)(1 - S_{lq})}{K_s} \right) dp_{gz} + \varphi (1 - S_{lq}) \frac{dp_{vp}}{p_{vp}} - 3 \alpha_{vp}^m dT \\ \frac{dm_{as}}{\rho_{as}} &= b (1 - S_{lq}) d\varepsilon_V + \left(-\varphi \frac{\partial S_{lq}}{\partial P_c} - \frac{(1 - S_{lq}) S_{lq} (b - \varphi)}{K_s} \right) dp_c + \left(\frac{(b - \varphi)(1 - S_{lq})}{K_s} \right) dp_{gz} + \varphi (1 - S_{lq}) \frac{dp_{as}}{p_{as}} - 3 \alpha_{as}^m dT \end{aligned} \right\} \text{éq 5.2.1-1}$$

On voit apparaître la dérivée de la saturation en liquide par rapport à la pression capillaire, quantité qui joue un rôle essentiel.

L'expression [éq 3.2.6-4] de la différentielle de la pression de vapeur permet aussi de calculer la pression d'air sec :

$$dp_{as} = \left(1 - \frac{M_{vp}^{ol} p_{vp}}{RT \rho_w} \right) dp_{gz} - \frac{M_{vp}^{ol}}{RT \rho_w} dp_c - \frac{M_{vp}^{ol}}{RT} \left(h_{vp}^m - h_w^m \right) \frac{dT}{T} \quad \text{éq 5.2.1-2}$$

On reporte [éq 5.2.1-2] et [éq 3.2.6-4] dans [éq 5.2.1-1] et on trouve :

$$\frac{dm_w}{\rho_w} = b S_{lq} d\varepsilon_V + \left(\varphi \frac{\partial S_{lq}}{\partial P_c} - \frac{S_{lq} \varphi}{K_w} - \frac{S_{lq}^2 (b - \varphi)}{K_s} \right) dp_c + S_{lq} \left(\frac{\varphi}{K_w} + \frac{(b - \varphi)}{K_s} \right) dp_{gz} - 3 \alpha_w^m dT \quad \text{éq 5.2.1-3}$$

$$\begin{aligned} \frac{dm_{vp}}{\rho_{vp}} &= b (1 - S_{lq}) d\varepsilon_V + \left(-\varphi \frac{\partial S_{lq}}{\partial P_c} - \frac{(1 - S_{lq}) S_{lq} (b - \varphi)}{K_s} - \frac{\varphi (1 - S_{lq}) \rho_{vp}}{p_{vp} \rho_{lq}} \right) dp_c \\ &+ \left(\frac{(1 - S_{lq})(b - \varphi)}{K_s} - \frac{\varphi (1 - S_{lq}) \rho_{vp}}{p_{vp} \rho_{lq}} \right) dp_{gz} \\ &+ \left(-3 \alpha_{vp}^m + \frac{\rho_{vp} \varphi (1 - S_{lq}) (h_{vp}^m - h_{lq}^m)}{p_{vp} T} \right) dT \end{aligned} \quad \text{éq 5.2.1-4}$$

$$\begin{aligned} \frac{dm_{as}}{\rho_{as}} &= b (1 - S_{lq}) d\varepsilon_V + \left(-\varphi \frac{\partial S_{lq}}{\partial P_c} - \frac{(1 - S_{lq}) S_{lq} (b - \varphi)}{K_s} - \frac{\varphi (1 - S_{lq}) \rho_{vp}}{p_{as} \rho_{lq}} \right) dp_c \\ &+ \left(\frac{(1 - S_{lq})(b - \varphi)}{K_s} - \frac{\varphi (1 - S_{lq}) \rho_{lq} - \rho_{vp}}{p_{as} \rho_{lq}} \right) dp_{gz} + \left(-3 \alpha_{as}^m + \frac{\rho_{vp} \varphi (1 - S_{lq}) (h_{vp}^m - h_{lq}^m)}{p_{as} T} \right) dT \end{aligned} \quad \text{éq 5.2.1-5}$$

5.2.2 Cas avec air dissous

Comme précédemment, en tenant compte de [éq 3.2.1-1] et de [éq 3.2.3.1-1], [éq 3.2.3.2-1], [éq 3.2.3.2-2], [éq 3.2.7.3] et en supposant $1 + \varepsilon_V \approx 1$ on trouve :

$$\frac{dm_w}{\rho_w} = bS_{lq} d\varepsilon_V + \left(\frac{S_{lq} \varphi}{K_w} \frac{\partial p_w}{\partial P_c} - \frac{S_{lq}^2 (b-\varphi)}{K_s} + \varphi \frac{\partial S_{lq}}{\partial P_c} \right) dp_c + S_{lq} \left(\frac{\varphi}{K_w} \frac{\partial p_w}{\partial P_{gz}} + \frac{(b-\varphi)}{K_s} \right) dp_{gz} + \left(\frac{\varphi S_{lq}}{K_w} \frac{\partial p_w}{\partial T} - 3\alpha_w^m \right) dT \quad \text{éq 5.2.2-1}$$

$$\frac{dm_{ad}}{\rho_{ad}} = bS_{lq} d\varepsilon_V + \left(\frac{S_{lq} \varphi M_{as}^{ol}}{\rho_{ad} K_H} \frac{\partial p_{as}}{\partial P_c} - \frac{S_{lq}^2 (b-\varphi)}{K_s} + \varphi \frac{\partial S_{lq}}{\partial P_c} \right) dp_c + S_{lq} \left(\frac{\varphi M_{as}^{ol}}{\rho_{ad} K_H} \frac{\partial p_{as}}{\partial P_{gz}} + \frac{(b-\varphi)}{K_s} \right) dp_{gz} + S_{lq} \left(\frac{\varphi M_{as}^{ol}}{\rho_{ad} K_H} \frac{\partial p_{as}}{\partial T} - 3\alpha_0 (b-\varphi) \right) dT \quad \text{éq 5.2.2-2}$$

$$\frac{dm_{vp}}{\rho_{vp}} = b(1-S_{lq}) d\varepsilon_V + \left(-\varphi \frac{\partial S_{lq}}{\partial P_c} - \frac{(1-S_{lq})S_{lq}(b-\varphi)}{K_s} - \frac{\varphi(1-S_{lq})\rho_{vp}}{p_{vp}\rho_{lq}} \right) dp_c + \left(\frac{(b-\varphi)(1-S_{lq})}{K_s} + \frac{\varphi(1-S_{lq})\rho_{vp}}{p_{vp}\rho_{lq}} \right) dp_{gz} + \left(-3\alpha_{vp}^m + \frac{\varphi\rho_{vp}(1-S_{lq})(h_{vp}^m - h_{lq}^m)}{p_{vp}T} \right) dT \quad \text{éq 5.2.2-3}$$

$$\frac{dm_{as}}{\rho_{as}} = b(1-S_{lq}) d\varepsilon_V + \left(-\varphi \frac{\partial S_{lq}}{\partial P_c} - \frac{(1-S_{lq})S_{lq}(b-\varphi)}{K_s} + \frac{\varphi(1-S_{lq})\rho_{vp}}{p_{as}\rho_{lq}} \right) dp_c + \left(\frac{(b-\varphi)(1-S_{lq})}{K_s} + \frac{\varphi(1-S_{lq})\rho_{lq} - \rho_{vp}}{p_{as}\rho_{lq}} \right) dp_{gz} + \left(-3\alpha_{vp}^m - \frac{\varphi\rho_{vp}(1-S_{lq})(h_{vp}^m - h_{lq}^m)}{p_{as}T} \right) dT \quad \text{éq 5.2.2-4}$$

Les dérivées partielles sont données en [§ Annexe 3].

5.3 Dérivées des enthalpies et de la chaleur Q'

Là encore, nous ne faisons que rappeler des expressions déjà fournies au chapitre 2 :

5.3.1 Cas sans air dissous

$$dh_w^m = (1 - 3\alpha_w T) \frac{dp_{gz} - dp_c}{\rho_w} + C_w^p dT$$

$$dh_{vp}^m = C_{vp}^p dT$$

$$dh_{as}^m = C_{as}^p dT$$

$$\delta Q' = 3\alpha_0 K_0 T d\varepsilon_V + 3\alpha_{lq}^m T dp_c - (3\alpha_{gz}^m + 3\alpha_{lq}^m) T dp_{gz} + C_\varepsilon^0 dT$$

5.3.2 Cas avec air dissous

$$dh_w^m = (1 - 3\alpha_w T) \frac{dp_{gz} - dp_c - dp_{ad}}{\rho_w} + C_w^p dT$$

$$= \left(\frac{1 - 3\alpha_w T}{\rho_w} \right) \left[\left(1 - \frac{\partial p_{ad}}{\partial p_{gz}} \right) dp_{gz} - \left(1 + \frac{\partial p_{ad}}{\partial p_c} \right) dp_c \right] + \left(C_w^p - \frac{1 - 3\alpha_w T}{\rho_w} \frac{\partial p_{ad}}{\partial T} \right) dT$$

$$\begin{aligned} dh_{ad}^m &= C_{ad}^p dT \\ dh_{vp}^m &= C_{vp}^p dT \\ dh_{as}^m &= C_{as}^p dT \\ \delta Q' &= 3\alpha_0 K_0 T d\varepsilon_v + 3\alpha_{lq}^m T dp_c - (3\alpha_{gz}^m + 3\alpha_{lq}^m) T dp_{gz} + C_\varepsilon^0 dT \end{aligned}$$

5.4 Dérivées du flux de chaleur

On part de [éq 3.2.5.1-1] et de [éq 3.2.5.1-2].

En différenciant [éq 3.2.5.1-2] et en utilisant [éq 3.2.1-1], on trouve :

$$\begin{aligned} d\lambda^T &= (b-\varphi)\lambda_\varphi^T(\varphi) \cdot \lambda_S^T(S_{lq}) \cdot \lambda_T^T(T) d\varepsilon_v \\ &+ \frac{(b-\varphi)}{K_s} \lambda_\varphi^T(\varphi) \cdot \lambda_S^T(S_{lq}) \cdot \lambda_T^T(T) dp_{gz} \\ &+ \left(\lambda_\varphi^T(\varphi) \cdot \lambda_S^T(S_{lq}) \cdot \lambda_T^T(T) \cdot \frac{\partial S_{lq}}{\partial p_c} - S_{lq} \frac{(b-\varphi)}{K_s} \lambda_\varphi^T(\varphi) \cdot \lambda_S^T(S_{lq}) \cdot \lambda_T^T(T) \right) dp_c \\ &+ \left(\lambda_\varphi^T(\varphi) \cdot \lambda_S^T(S_{lq}) \cdot \lambda_T^T(T) - (b-\varphi) \cdot 3\alpha_0 \lambda_\varphi^T(\varphi) \cdot \lambda_S^T(S_{lq}) \cdot \lambda_T^T(T) \right) dT \end{aligned}$$

Soit finalement :

$$\begin{aligned} dq &= -(b-\varphi)\lambda_\varphi^T(\varphi) \cdot \lambda_S^T(S_{lq}) \cdot \lambda_T^T(T) \nabla T d\varepsilon_v \\ &- \frac{(b-\varphi)}{K_s} \lambda_\varphi^T(\varphi) \cdot \lambda_S^T(S_{lq}) \cdot \lambda_T^T(T) \nabla T dp_{gz} \\ &- \left(\lambda_\varphi^T(\varphi) \cdot \lambda_S^T(S_{lq}) \cdot \lambda_T^T(T) \cdot \frac{\partial S_{lq}}{\partial p_c} - S_{lq} \frac{(b-\varphi)}{K_s} \lambda_\varphi^T(\varphi) \cdot \lambda_S^T(S_{lq}) \cdot \lambda_T^T(T) \right) \nabla T dp_c \\ &- \left(\lambda_\varphi^T(\varphi) \cdot \lambda_S^T(S_{lq}) \cdot \lambda_T^T(T) - (b-\varphi) \cdot 3\alpha_0 \lambda_\varphi^T(\varphi) \cdot \lambda_S^T(S_{lq}) \cdot \lambda_T^T(T) \right) \nabla T dT \end{aligned} \tag{éq 5.4-1}$$

5.5 Dérivée des flux hydriques

Il faut bien sûr repartir des équations [éq 3.2.5.2-15], [éq 3.2.5.2-16], [éq 3.2.5.2-17] et [éq 3.2.5.2-18] que l'on différencie.

5.5.1 Cas sans air dissous

$$\begin{aligned} d\mathbf{M}_{as} &= \left(\frac{\mathbf{M}_{as}}{\rho_{as}} + \rho_{as} \lambda_{gz}^H \mathbf{F}^m \right) d\rho_{as} + \frac{\mathbf{M}_{as} - \rho_{as} C_{vp} F_{vp} \nabla C_{vp}}{\lambda_{lq}^H} d\lambda_{gz}^H \\ &+ \rho_{as} \lambda_{gz}^H \left(-d\nabla p_{gz} + d\rho_{vp} \mathbf{F}^m \right) \\ &+ \rho_{as} C_{vp} \left(\frac{\partial F_{vp}}{\partial T} dT + \frac{\partial F_{vp}}{\partial p_{gz}} p_{gz} \right) \nabla C_{vp} + \rho_{as} dC_{vp} F_{vp} \nabla C_{vp} + \rho_{as} C_{vp} F_{vp} d\nabla C_{vp} \end{aligned} \tag{éq 5.5.1-1}$$

$$\begin{aligned}
 d \mathbf{M}_{vp} = & \left(\frac{\mathbf{M}_{vp}}{\rho_{vp}} + \rho_{vp} \lambda_{gz}^H \mathbf{F}^m \right) d \rho_{vp} + \frac{\mathbf{M}_{vp} + \rho_{vp} (1 - C_{vp}) F_{vp} \nabla C_{vp}}{\lambda_{gz}^H} d \lambda_{gz}^H \\
 & + \rho_{vp} \lambda_{gz}^H \left(-d \nabla p_{gz} + d \rho_{as} \mathbf{F}^m \right) \\
 & - (1 - C_{vp}) \rho_{vp} \left(\frac{\partial F_{vp}}{\partial T} dT + \frac{\partial F_{vp}}{\partial p_{gz}} p_{gz} \right) \nabla C_{vp} + \rho_{vp} dC_{vp} F_{vp} \nabla C_{vp} - \rho_{vp} (1 - C_{vp}) F_{vp} d \nabla C_{vp}
 \end{aligned} \tag{5.5.1-2}$$

$$\begin{aligned}
 d \mathbf{M}_w = & \left(\frac{\mathbf{M}_w}{\rho_w} + \rho_w \lambda_{lq}^H F^m \right) d \rho_w + \frac{\mathbf{M}_w}{\lambda_{lq}^H} d \lambda_{lq}^H \\
 & - \rho_w \lambda_{lq}^H \left(d \nabla p_{gz} - d \nabla p_c \right)
 \end{aligned} \tag{5.5.1-3}$$

Afin d'expliciter complètement ces différentielles, il faut connaître les différentielles des masses volumiques des fluides, ainsi que les différentielles de $C_{vp} = \frac{p_{vp}}{p_{gz}}$ et de son gradient. Connaissant [éq 3.2.6-4], on peut alors calculer la différentielle de la pression d'air sec :

$$dp_{as} = dp_{gz} - dp_{vp} = \frac{\rho_w - \rho_{vp}}{\rho_w} dp_{gz} + \frac{\rho_{vp}}{\rho_w} dp_c - \rho_{vp} \left(h_{vp}^m - h_w^m \right) \frac{dT}{T} \tag{5.5.1-4}$$

En dérivant la relation des gaz parfaits on a : $\frac{d \rho_{as}}{\rho_{as}} = \frac{dp_{as}}{p_{as}} - \frac{dT}{T}$ et $\frac{d \rho_{vp}}{\rho_{vp}} = \frac{dp_{vp}}{p_{vp}} - \frac{dT}{T}$, ce qui, en utilisant [éq 3.2.6-4] et [éq 5.5.1-4] donne :

$$d \rho_{vp} = \frac{\rho_{vp}^2}{\rho_w p_{vp}} dp_{gz} - \frac{\rho_{vp}^2}{\rho_w p_{vp}} dp_c + \left(\frac{\rho_{vp}^2 (h_{vp}^m - h_w^m)}{T p_{vp}} - \frac{\rho_{vp}}{T} \right) dT \tag{5.5.1-5}$$

$$d \rho_{as} = \frac{\rho_{as}}{p_{as}} \frac{\rho_w - \rho_{vp}}{\rho_w} dp_{gz} + \frac{\rho_{as}}{p_{as}} \frac{\rho_{vp}}{\rho_w} dp_c + \left(-\frac{\rho_{as} \rho_{vp} (h_{vp}^m - h_w^m)}{T p_{as}} - \frac{\rho_{as}}{T} \right) dT \tag{5.5.1-6}$$

[éq 3.2.6-4] permet d'exprimer le gradient de la pression de vapeur :

$$\nabla p_{vp} = \frac{\rho_{vp}}{\rho_{lq}} (\nabla p_{gz} - \nabla p_c) + \rho_{vp} (h_{vp}^m - h_{lq}^m) \frac{\nabla T}{T} \tag{5.5.1-7}$$

En différentiant [éq 5.5.1-7] on trouve :

$$d \nabla p_{vp} = \frac{\rho_{vp}}{\rho_w} (d \nabla p_{gz} - d \nabla p_c) + \left(\frac{d \rho_{vp}}{\rho_w} - \frac{\rho_{vp}}{\rho_w^2} d \rho_w \right) (\nabla p_{gz} - \nabla p_c) + \rho_{vp} \left(\frac{h_{vp}^m - h_w^m}{T} \right) d \nabla T + d \left(\rho_{vp} \left(\frac{h_{vp}^m - h_w^m}{T} \right) \right) \nabla T$$

éq 5.5.1-8

Le dernier terme de [éq 5.5.1-8] s'écrit :

$$d \left(\rho_{vp} \left(\frac{h_{vp}^m - h_w^m}{T} \right) \right) \nabla T = \left(\frac{h_{vp}^m - h_w^m}{T} \right) \nabla T d \rho_{vp} + \frac{\rho_{vp}}{T} \nabla T (dh_{vp}^m - dh_w^m) - \rho_{vp} (h_{vp}^m - h_w^m) \nabla T \frac{dT}{T^2}$$

éq 5.5.1-9

Connaissant les différentielles de la pression de vapeur et de son gradient, les expressions des différentielles de C_{vp} et de son gradient sont faciles à calculer :

$$dC_{vp} = \frac{dp_{vp}}{p_{gz}} - \frac{p_{vp}}{p_{gz}^2} dp_{gz} \text{ qui donne : } \nabla C_{vp} = \frac{\nabla p_{vp}}{p_{gz}} - \frac{p_{vp}}{p_{gz}^2} \nabla p_{gz} \text{ et que l'on différencie en :}$$

$$d \nabla C_{vp} = d \left[\frac{\nabla p_{vp}}{p_{gz}} - \frac{p_{vp}}{p_{gz}^2} \nabla p_{gz} \right] = \frac{d \nabla p_{vp}}{p_{gz}} - \frac{\nabla p_{gz}}{p_{gz}^2} dp_{vp} + \left(2 \frac{p_{vp}}{p_{gz}^3} \nabla p_{gz} - \frac{\nabla p_{vp}}{p_{gz}^2} \right) dp_{gz} - \frac{p_{vp}}{p_{gz}^2} d \nabla p_{gz}$$

dp_{vp} est donné par [éq 3.2.6-4] et $d \nabla p_{vp}$ par [éq 5.5.1-8].

5.5.2 Cas avec air dissous

$$d \mathbf{M}_{as} = \left(\frac{\mathbf{M}_{as}}{\rho_{as}} + \rho_{as} \lambda_{gz}^H \mathbf{F}^m \right) d \rho_{as} + \frac{\mathbf{M}_{as} - \rho_{as} C_{vp} F_{vp} \nabla C_{vp}}{\lambda_{gz}^H} d \lambda_{gz}^H + \rho_{as} \lambda_{gz}^H (-d \nabla p_{gz} + d \rho_{vp} \mathbf{F}^m) + \rho_{as} C_{vp} \left(\frac{\partial F_{vp}}{\partial T} dT + \frac{\partial F_{vp}}{\partial p_{gz}} dp_{gz} \right) \nabla C_{vp} + \rho_{as} dC_{vp} F_{vp} \nabla C_{vp} + \rho_{as} C_{vp} F_{vp} d \nabla C_{vp}$$

éq 5.5.2-1

$$d \mathbf{M}_{vp} = \left(\frac{\mathbf{M}_{vp}}{\rho_{vp}} + \rho_{vp} \lambda_{gz}^H \mathbf{F}^m \right) d \rho_{vp} + \frac{\mathbf{M}_{vp} + \rho_{vp} (1 - C_{vp}) F_{vp} \nabla C_{vp}}{\lambda_{gz}^H} d \lambda_{gz}^H + \rho_{vp} \lambda_{gz}^H (-d \nabla p_{gz} + d \rho_{as} \mathbf{F}^m) - (1 - C_{vp}) \rho_{vp} \left(\frac{\partial F_{vp}}{\partial T} dT + \frac{\partial F_{vp}}{\partial p_{gz}} dp_{gz} \right) \nabla C_{vp} + \rho_{vp} dC_{vp} F_{vp} \nabla C_{vp} - \rho_{vp} (1 - C_{vp}) F_{vp} d \nabla C_{vp}$$

éq 5.5.2-2

$$d \mathbf{M}_w = \left(\frac{\mathbf{M}_w}{\rho_w} + \rho_w \lambda_{lq}^H \mathbf{F}^m \right) d \rho_w + \frac{\mathbf{M}_w}{\lambda_{lq}^H} d \lambda_{lq}^H + \rho_w \lambda_{lq}^H (-d \nabla p_{lq} + d \rho_{ad} \mathbf{F}^m) \text{ éq 5.5.2-3}$$

$$\begin{aligned}
 d \mathbf{M}_{ad} = & \left(-\lambda_{lq}^H \nabla p_{lq} + \rho_{lq} \lambda_{lq}^H \mathbf{F}^m \right) d \rho_{ad} + \rho_{ad} \left(-\lambda_{lq}^H (\nabla p_{lq} + \rho_{lq} \mathbf{F}^m) \right) d \lambda_{lq}^H \\
 & + \rho_{ad} \lambda_{lq}^H \left(-d \nabla p_{lq} + d \rho_w \mathbf{F}^m \right) \\
 & - \left(\frac{\partial F_{ad}}{\partial T} dT + \frac{\partial F_{ad}}{\partial p_c} dp_c \right) \nabla C_{ad} - F_{ad} d \nabla C_{ad}
 \end{aligned}
 \tag{5.5.2-4}$$

Il faut connaître les différentielles des masses volumiques des fluides, ainsi que les différentielles de $C_{vp} = \frac{p_{vp}}{p_{gz}}$, $C_{ad} = \rho_{ad}$ et de leur gradient. On va tout d'abord calculer les différentielles des masses volumiques en utilisant les dérivées partielles de pressions données dans [§Annexe 3].

En dérivant la relation des gaz parfaits on a : $\frac{d \rho_{as}}{\rho_{as}} = \frac{dp_{as}}{p_{as}} - \frac{dT}{T}$ et $\frac{d \rho_{vp}}{\rho_{vp}} = \frac{dp_{vp}}{p_{vp}} - \frac{dT}{T}$, que l'on peut exprimer sous la forme :

$$d \rho_{as} = \frac{\rho_{as}}{p_{as}} \left(\frac{\partial p_{as}}{\partial p_c} dp_c + \frac{\partial p_{as}}{\partial p_{gz}} dp_{gz} \right) + \left(\frac{\rho_{as}}{p_{as}} \frac{\partial p_{as}}{\partial T} - \frac{\rho_{as}}{T} \right) dT
 \tag{5.5.2-5}$$

$$d \rho_{vp} = \frac{\rho_{vp}}{p_{vp}} \left(\frac{\partial p_{vp}}{\partial p_c} dp_c + \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{gz}} dp_{gz} \right) + \left(\frac{\rho_{vp}}{p_{vp}} \frac{\partial p_{vp}}{\partial T} - \frac{\rho_{vp}}{T} \right) dT
 \tag{5.5.2-6}$$

En utilisant la relation [eq 3.2.3.1-1], on obtient :

$$d \rho_w = \frac{\rho_w}{K_w} \left(\frac{\partial p_w}{\partial p_c} dp_c + \frac{\partial p_w}{\partial p_{gz}} dp_{gz} \right) + \left(\frac{\rho_w}{K_w} \frac{\partial p_w}{\partial T} - 3 \rho_w \alpha_w \right) dT
 \tag{5.5.2-7}$$

Et comme $d \rho_{ad} = \frac{M_{as}^{ol}}{K_H} dp_{as}$,

$$d \rho_{ad} = \frac{M_{as}^{ol}}{K_H} \left(\frac{\partial p_{as}}{\partial p_c} dp_c + \frac{\partial p_{as}}{\partial p_{gz}} dp_{gz} + \frac{\partial p_{as}}{\partial T} dT \right)
 \tag{5.5.2-8}$$

Comme précédemment, on utilise l'expression :

$$dC_{vp} = \frac{dp_{vp}}{p_{gz}} - \frac{p_{vp}}{p_{gz}^2} dp_{gz} \text{ qui donne :}$$

$$dC_{vp} = \frac{1}{p_{gz}} \left(\frac{\partial p_{vp}}{\partial p_c} dp_c + \frac{\partial p_{vp}}{\partial T} dT \right) + \left(\frac{1}{p_{gz}} \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{gz}} - \frac{p_{vp}}{p_{gz}^2} \right) dp_{gz}
 \tag{5.5.2-9}$$

et $\nabla C_{vp} = \frac{\nabla p_{vp}}{p_{gz}} - \frac{p_{vp}}{p_{gz}^2} \nabla p_{gz}$ et que l'on différencie en :

$$d \nabla C_{vp} = d \left[\frac{\nabla p_{vp}}{p_{gz}} - \frac{p_{vp}}{p_{gz}^2} \nabla p_{gz} \right] = \frac{d \nabla p_{vp}}{p_{gz}} - \frac{\nabla p_{gz}}{p_{gz}^2} dp_{vp} + \left(2 \frac{p_{vp}}{p_{gz}^3} \nabla p_{gz} - \frac{\nabla p_{vp}}{p_{gz}^2} \right) dp_{gz} - \frac{p_{vp}}{p_{gz}^2} d \nabla p_{gz}$$

éq 5.5.2-10

avec

$$\nabla p_{vp} = \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{gz}} \nabla p_{gz} + \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_c} \nabla p_c + \frac{\partial p_{vp}}{\partial T} \nabla T$$

éq 5.5.2-11

et $d \nabla p_{vp}$ que l'on différencie de la manière suivante :

$$\begin{aligned} d \nabla p_{vp} &= d \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{gz}} \nabla p_{gz} + d \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_c} \nabla p_c + d \frac{\partial p_{vp}}{\partial T} \nabla T + \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{gz}} d \nabla p_{gz} + \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_c} d \nabla p_c + \frac{\partial p_{vp}}{\partial T} d \nabla T \\ &= \left(\frac{\partial}{\partial p_c} \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{gz}} \nabla p_{gz} + \frac{\partial}{\partial p_c} \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_c} \nabla p_c + \frac{\partial}{\partial p_c} \frac{\partial p_{vp}}{\partial T} \nabla T \right) dp_c \\ &+ \left(\frac{\partial}{\partial p_{gz}} \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{gz}} \nabla p_{gz} + \frac{\partial}{\partial p_{gz}} \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_c} \nabla p_c + \frac{\partial}{\partial p_{gz}} \frac{\partial p_{vp}}{\partial T} \nabla T \right) dp_{gz} \\ &+ \left(\frac{\partial}{\partial T} \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{gz}} \nabla p_{gz} + \frac{\partial}{\partial T} \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_c} \nabla p_c + \frac{\partial}{\partial T} \frac{\partial p_{vp}}{\partial T} \nabla T \right) dT \\ &+ \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{gz}} d \nabla p_{gz} + \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_c} d \nabla p_c + \frac{\partial p_{vp}}{\partial T} d \nabla T \end{aligned}$$

éq 5.5.2-12

Les dérivées partielles du second ordre sont développées dans l'[Annexe 4].

Pour l'air dissous, on procède avec les mêmes étapes :

$$C_{ad} = \rho_{ad} = M_{ad}^{ol} \cdot \frac{p_{ad}}{RT}$$

donc :

$$dC_{ad} = M_{ad}^{ol} \cdot \left(\frac{dp_{ad}}{RT} - \frac{p_{ad}}{RT^2} dT \right) \text{ qui donne :}$$

$$dC_{ad} = M_{ad}^{ol} \cdot \left[\left(\frac{1}{RT} \frac{\partial p_{ad}}{\partial p_c} \right) dp_c + \left(\frac{1}{RT} \frac{\partial p_{ad}}{\partial p_{gz}} \right) dp_{gz} + \left(\frac{\partial p_{ad}}{\partial T} - \frac{p_{ad}}{RT^2} \right) \frac{1}{p_{lq}} dT \right]$$

éq 5.5.2-13

$$\text{et } \nabla C_{ad} = M_{ad}^{ol} \cdot \left(\frac{\nabla p_{ad}}{RT} - \frac{p_{ad}}{RT^2} \nabla T \right) \text{ et que l'on différencie en :}$$

$$d \nabla C_{ad} = M_{ad}^{ol} \left[\frac{1}{RT} d \nabla p_{ad} - \frac{1 \nabla T}{RT^2} dp_{ad} + \left(2 \frac{p_{ad}}{RT^3} \nabla T - \frac{\nabla p_{ad}}{RT^2} \right) dT - \left(\frac{p_{ad}}{RT^2} \right) d \nabla T \right]$$

éq 5.5.2-14

avec :

$$\nabla p_{ad} = \frac{\partial p_{ad}}{\partial p_{gz}} \nabla p_{gz} + \frac{\partial p_{ad}}{\partial p_c} \nabla p_c + \frac{\partial p_{ad}}{\partial T} \nabla T \quad \text{éq 5.5.2-15}$$

et $d \nabla p_{ad}$ que l'on différencie de la manière suivante :

$$\begin{aligned} &= \left(\frac{\partial}{\partial p_c} \frac{\partial p_{ad}}{\partial p_{gz}} \nabla p_{gz} + \frac{\partial}{\partial p_c} \frac{\partial p_{ad}}{\partial p_c} \nabla p_c + \frac{\partial}{\partial p_c} \frac{\partial p_{ad}}{\partial T} \nabla T \right) dp_c \\ &+ \left(\frac{\partial}{\partial p_{gz}} \frac{\partial p_{ad}}{\partial p_{gz}} \nabla p_{gz} + \frac{\partial}{\partial p_{gz}} \frac{\partial p_{ad}}{\partial p_c} \nabla p_c + \frac{\partial}{\partial p_{gz}} \frac{\partial p_{ad}}{\partial T} \nabla T \right) dp_{gz} \\ &+ \left(\frac{\partial}{\partial T} \frac{\partial p_{ad}}{\partial p_{gz}} \nabla p_{gz} + \frac{\partial}{\partial T} \frac{\partial p_{ad}}{\partial p_c} \nabla p_c + \frac{\partial}{\partial T} \frac{\partial p_{ad}}{\partial T} \nabla T \right) dT \\ &+ \frac{\partial p_{ad}}{\partial p_{gz}} d \nabla p_{gz} + \frac{\partial p_{ad}}{\partial p_c} d \nabla p_c + \frac{\partial p_{ad}}{\partial T} d \nabla T \end{aligned} \quad \text{éq 5.5.2-16}$$

Les dérivées partielles du second ordre sont développées dans l'[Annexe 4].

6 Bibliographie

- 1) O. COUSSY : « Mécanique des milieux poreux ». Éditions TECHNIP.
- 2) C. CHAVANT, P. CHARLES, Th. DUFORESTEL, F. VOLDOIRE : « Thermo-hydro-mécanique des milieux poreux non saturés dans le *Code_Aster* ». Note HI-74/99/011/A.
- 3) I. VAUTIER, P. MIALON, E. LORENTZ : « Algorithme non linéaire quasi statique (opérateur STAT_NON_LINE) ». Document *Aster* [R5.03.01].
- 4) C. CHAVANT : « Modélisations THHM généralités et algorithmes ». Document *Aster* [R7.01.10].
- 5) A. GIRAUD : « Adaptation au modèle poroélastique non linéaire de Lassabatère-Coussy à la modélisation milieu poreux non saturé ». (ENSG).
- 6) J. WABINSKI, F. VOLDOIRE : Thermohydro-mécanique en milieu saturé. Note EDF/DER HI/74/96/010, de septembre 1996.
- 7) T. LASSABATERE : « Couplages hydromécaniques en milieu poreux non saturé avec changement de phase : application au retrait de dessiccation du béton ». Thèse ENPC.
- 8) Ph. MESTAT, M. PRAT : « Ouvrages en interaction ». Hermes.
- 9) J. F. THILUS et al : « Poro-mechanics », Biot Conférence 1998.
- 10) A. W. BISHOP & G. E. BLIGHT: « Somme Aspects of Effective Stress in Saturated and Partly Saturated Soils », Géotechnique n° 3 vol. XIII, pp. 177-197. 1963.

7 Description des versions du document

| Version Aster | Auteur(s) Organisme(s) | Description des modifications |
|---------------|-------------------------------------|---|
| 5 | C.Chavant EDF-R&D/AMA | Version initiale |
| 7.4 | C.Chavant, S.Granet, EDF-R&D/AMA | |
| 9.2 | S.Granet EDF-R&D/AMA | Loi de Van Genuchten |
| 10.2 | S. Meunier, EDF R&D/AMA | Modélisation Hydraulique Saturée |
| 11.2 | F.Voldoire EDF-R&D/AMA | Modifications de mise en forme des équations, quelques corrections ici ou là. |

Annexe 1 Contraintes généralisées et variables internes

Les contraintes :

| Numéro | Nom de composante Aster | Contenu |
|--------|-------------------------|----------------|
| 1 | SIXX | σ'_{xx} |
| 2 | SIYY | σ'_{yy} |
| 3 | SIZZ | σ'_{zz} |
| 4 | SIXY | σ'_{xy} |
| 5 | SIXZ | σ'_{xz} |
| 6 | SIYZ | σ'_{yz} |
| 7 | SIP | σ_p |
| 8 | M11 | m_w |
| 9 | FH11X | M_{w_x} |
| 10 | FH11Y | M_{w_y} |
| 11 | FH11Z | M_{w_z} |
| 12 | ENT11 | h_w^m |
| 13 | M12 | m_{vp} |
| 14 | FH12X | M_{vp_x} |
| 15 | FH12Y | M_{vp_y} |
| 16 | FH12Z | M_{vp_z} |
| 17 | ENT12 | h_{vp}^m |
| 18 | M21 | m_{as} |
| 19 | FH21X | M_{as_x} |
| 20 | FH21Y | M_{as_y} |
| 21 | FH21Z | M_{as_z} |
| 22 | ENT21 | h_{as}^m |
| 18 | M22 | m_{ad} |
| 19 | FH22X | M_{ad_x} |
| 20 | FH22Y | M_{ad_y} |
| 21 | FH22Z | M_{ad_z} |
| 22 | ENT22 | h_{ad}^m |
| 23 | QPRIM | Q' |
| 24 | FHTX | q_x |
| 25 | FHTY | q_y |
| 26 | FHTZ | q_z |

Dans le cas sans mécanique, et pour les lois de comportements (LIQU_VAPE_GAZ, LIQU_VAPE, LIQU_AD_GAZ_VAPE et LIQU_AD_GAZ) les variables internes sont :

| Numéro | Nom de composante Code_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 Code_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 Code_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 Données matériau

On donne ici la correspondance entre le vocabulaire des commandes Aster et les notations utilisées dans la présente note pour les différentes grandeurs caractéristiques des matériaux.

A2.1 Mot clé facteur THM_LIQU

| | | |
|---|-------------|---|
| ◆ | RHO | ρ_{lq}^0 |
| ◇ | UN_SUR_K | $\frac{1}{K_{lq}}$ |
| ◇ | ALPHA | α_{lq} |
| ◇ | CP | C_{lq}^p |
| ◇ | VISC | $\mu_{lq}(T)$ |
| ◇ | D_VISC_TEMP | $\frac{\partial \mu_{lq}}{\partial T}(T)$ |

A2.2 Mot clé facteur THM_GAZ

| | | |
|---|-------------|---|
| ◇ | MASS_MOL | M_{as}^{ol} |
| ◇ | CP | C_{lq}^P |
| ◇ | VISC | $\mu_{as}(T)$ |
| ◇ | D_VISC_TEMP | $\frac{\partial \mu_{as}}{\partial T}(T)$ |

A2.3 Mot clé facteur THM_VAPE_GAZ

| | | |
|---|-------------|---|
| ◇ | MASS_MOL | M_{VP}^{ol} |
| ◇ | CP | C_{vp}^P |
| ◇ | VISC | $\mu_{vp}(T)$ |
| ◇ | D_VISC_TEMP | $\frac{\partial \mu_{vp}}{\partial T}(T)$ |

A2.4 Mot clé facteur THM_AIR_DISS

| | | |
|---|------------|------------|
| ◇ | CP | C_{ad}^P |
| ◇ | COEF_HENRY | K_H |

A2.5 Mot clé facteur THM_INIT

| | | |
|---|-----------|---------------|
| ◆ | TEMP | $^{init} T$ |
| ◆ | PRE1 | $^{init} P_1$ |
| ◆ | PRE2 | $^{init} P_2$ |
| ◆ | PORO | Φ^0 |
| ◆ | PRES_VAPE | P_{vp}^0 |

On rappelle que, selon la modélisation, les deux pressions P_1 et P_2 représentent :

| | LIQU_SATU | LIQU_VAPE | LIQU_GAZ_ATM | GAZ | LIQU_VAPE_GAZ |
|-------|-----------|-----------|--------------|----------|----------------------|
| P_1 | p_w | p_w | $p_c = -p_w$ | p_{gz} | $p_c = p_{gz} - p_w$ |
| P_2 | | | | | p_{gz} |

| | LIQU_GAZ | LIQU_AD_GAZ_VAPE | LIQU_AD_GAZ |
|-------|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| P_1 | $p_c = p_{gz} - p_w$ | $p_c = p_{gz} - p_w - p_{ad}$ | $p_c = p_{gz} - p_w - p_{ad}$ |
| P_2 | p_{gz} | p_{gz} | p_{gz} |

A2.6 Mot clé facteur THM_DIFFU

| | | |
|---|-----------|----------------|
| ◆ | R_GAZ | R |
| ◇ | RHO | r_0 |
| ◇ | CP | C_{σ}^S |
| ◇ | BIOT_COEF | b |
| ◇ | SATU_PRES | $S_{lq}(p_c)$ |

| | | |
|---|------------------|---|
| ◇ | D_SATU_PRES | $\frac{\partial S_{lq}}{\partial p_c}(p_c)$ |
| ◇ | PESA_X | \mathbf{F}_x^m |
| ◇ | PESA_Y | \mathbf{F}_y^m |
| ◇ | PESA_Z | \mathbf{F}_z^m |
| ◇ | PERM_IN | $K^{int}(\varphi)$ |
| ◇ | PERM_LIQU | $K_{lq}^{rel}(S_{lq})$ |
| ◇ | D_PERM_LIQU_SATU | $\frac{\partial k_{lq}^{rel}}{\partial S_{lq}}(S_{lq})$ |
| ◇ | PERM_GAZ | $k_{gz}^{rel}(S_{lq}, p_{gz})$ |
| ◇ | D_PERM_SATU_GAZ | $\frac{\partial k_{gz}^{rel}}{\partial S_{lq}}(S_{lq}, p_{gz})$ |
| ◇ | D_PERM_PRES_GAZ | $\frac{\partial k_{gz}^{rel}}{\partial p_{gz}}(S_{lq}, p_{gz})$ |
| ◇ | 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 | $\frac{\partial f_{vp}^T}{\partial T}(T)$ |
| ◇ | D_FV_PG | $\frac{\partial f_{vp}^{gz}}{\partial P_{gz}}(P_{gz})$ |
| ◇ | 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 | $\frac{\partial f_{vp}^T}{\partial T}(T)$ |
| ◇ | LAMB_T | $\lambda_T^T(T)$ |
| ◇ | DLAMB_T | $\frac{\partial \lambda_T^T}{\partial T}(T)$ |
| ◇ | LAMB_PHI | $\lambda_\phi^T(\phi)$ |
| ◇ | DLAMBPHI | $\frac{\partial \lambda_\phi^T}{\partial \phi}(\phi)$ |
| ◇ | LAMB_S | $\lambda_S^T(S)$ |
| ◇ | DLAMBS | $\frac{\partial \lambda_S^T}{\partial S}(S)$ |
| ◇ | LAMB_CT | λ_{CT}^T |

Remarque :

Pour les modélisations faisant intervenir la thermique, et pour le calcul de la chaleur spécifique homogénéisée, on utilise la relation : $C_{\sigma}^0 = (1 - \varphi) \rho_s C_{\sigma}^s + \rho_{lq} S_{lq} \varphi C_{lq}^p + (1 - S_{lq}) \varphi (\rho_{vp} C_{vp}^p + \rho_{as} C_{as}^p)$. Dans cette formule, on confond ρ_s avec sa valeur initiale ρ_s^0 dont la valeur est lue sous le mot clé RHO du mot clé facteur ELAS.

Annexe 3 Dérivées des pressions en fonction des déformations généralisées

On détaille ici le calcul des dérivées de pression en fonction des déformations généralisées. On rappelle que

l'équation [éq 3.2.6.3] est $\frac{dp_{vp}}{\rho_{vp}} = \frac{dp_w}{\rho_w} + L \frac{dT}{T}$ avec $L = h_{vp}^m - h_w^m$. En outre

$dp_{ad} = dp_{lq} - dp_w = \frac{R}{K_H} p_{as} dT + \frac{RT}{K_H} dp_{as}$ et $dp_{as} = dp_{gz} - dp_{vp}$. En combinant ces équations on obtient :

$$\begin{cases} dp_{vp} \left[\frac{RT}{K_H} - \frac{\rho_w}{\rho_{vp}} \right] = (-L \rho_w + p_{ad}) \frac{dT}{T} + \left(\frac{RT}{K_H} - 1 \right) dp_{gz} + dp_c \\ dp_w \left[\frac{\rho_{vp} RT}{\rho_w K_H} - 1 \right] = \left(-LR \frac{\rho_{vp}}{K_H} + \frac{p_{ad}}{T} \right) dT + \left(\frac{RT}{K_H} - 1 \right) dp_{gz} + dp_c \end{cases}$$

On peut donc écrire les dérivées partielles de l'eau et de la vapeur en fonction des déformations généralisées :

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_w}{\partial T} &= \frac{-LR \frac{\rho_{vp}}{K_H} + \frac{p_{ad}}{T}}{\frac{\rho_{vp} RT}{\rho_w K_H} - 1}; & \frac{\partial p_w}{\partial p_{gz}} &= \frac{\frac{RT}{K_H} - 1}{\frac{\rho_{vp} RT}{\rho_w K_H} - 1}; & \frac{\partial p_w}{\partial p_c} &= \frac{1}{\frac{\rho_{vp} RT}{\rho_w K_H} - 1} \\ \frac{\partial p_{vp}}{\partial T} &= \frac{(-L \rho_w + p_{ad})}{\frac{RT}{K_H} - \frac{\rho_w}{\rho_{vp}}} \cdot \frac{1}{T}; & \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{gz}} &= \frac{\frac{RT}{K_H} - 1}{\frac{RT}{K_H} - \frac{\rho_w}{\rho_{vp}}}; & \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_c} &= \frac{1}{\frac{RT}{K_H} - \frac{\rho_w}{\rho_{vp}}} \end{aligned}$$

Les relations $dp_{as} = dp_{gz} - dp_{vp}$ et $dp_{ad} = dp_{gz} - dp_c - dp_w$ permettent de dériver toutes les pressions, puisqu'on aura :

$$\frac{\partial p_{as}}{\partial T} = -\frac{\partial p_{vp}}{\partial T}; \quad \frac{\partial p_{as}}{\partial p_{gz}} = 1 - \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{gz}}; \quad \frac{\partial p_{as}}{\partial p_c} = -\frac{\partial p_{vp}}{\partial p_c}$$

et

$$\frac{\partial p_{ad}}{\partial T} = -\frac{\partial p_w}{\partial T}; \quad \frac{\partial p_{ad}}{\partial p_{gz}} = 1 - \frac{\partial p_w}{\partial p_{gz}}; \quad \frac{\partial p_{ad}}{\partial p_c} = -1 - \frac{\partial p_w}{\partial p_c}$$

Annexe 4 Dérivées secondes des pressions de vapeur et d'air dissous en fonction des déformations généralisées

On calcule ici les dérivées partielles du second ordre de la pression de vapeur nécessaires à la section [5.5.2]. On notera par la suite :

$$A1 = \frac{RT}{K_H} - \frac{\rho_w}{\rho_{vp}} \quad \text{et} \quad A2 = \frac{\rho_w}{\rho_{vp}} \left(\frac{RT}{K_H} - 1 \right)$$

$$A3 = \frac{1}{p_{vp}} \frac{\partial p_{vp}}{\partial T} - \frac{1}{T} - \frac{1}{K_w} \frac{\partial p_w}{\partial T} - 3\alpha_w$$

$$A4 = -\frac{1}{p_{vp}} \frac{\partial p_{vp}}{\partial T} + \frac{1}{T} + \frac{1}{K_w} \frac{\partial p_w}{\partial T} - 3\alpha_w$$

Dérivées secondes de la pression de vapeur :

$$\frac{\partial}{\partial p_c} \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{gz}} = \frac{A2}{AI^2} \left(\frac{1}{K_w} \frac{\partial p_w}{\partial p_c} - \frac{1}{p_{vp}} \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_c} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial p_{gz}} \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{gz}} = \frac{A2}{AI^2} \left(\frac{1}{K_w} \frac{\partial p_w}{\partial p_{gz}} - \frac{1}{p_{vp}} \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{gz}} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial T} \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{gz}} = \frac{R}{K_H AI} - \frac{1}{AI^2} \left(\frac{RT}{K_H} - 1 \right) \left(\frac{R}{K_H} - \frac{\rho_w}{\rho_{vp}} A4 \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial p_c} \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_c} = -\frac{\rho_w}{\rho_{vp}} \frac{1}{AI^2} \left(\frac{1}{p_{vp}} \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_c} - \frac{1}{K_w} \frac{\partial p_w}{\partial p_c} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial p_{gz}} \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_c} = -\frac{\rho_w}{\rho_{vp}} \frac{1}{AI^2} \left(\frac{1}{p_{vp}} \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{gz}} - \frac{1}{K_w} \frac{\partial p_w}{\partial p_{gz}} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial T} \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_c} = -\frac{1}{AI^2} \left(\frac{R}{K_H} - \frac{\rho_w}{\rho_{vp}} A4 \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial p_c} \frac{\partial p_{vp}}{\partial T} = -\frac{1}{T} \frac{1}{AI^2} \left(AI \left(1 - \frac{\partial p_w}{\partial p_c} \left(1 + L \frac{\rho_w}{K_w} \right) \right) + (p_{ad} - L\rho_w) \frac{\rho_w}{\rho_{vp}} \left(\frac{1}{K_w} \frac{\partial p_w}{\partial p_c} - \frac{1}{p_{vp}} \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_c} \right) \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial p_{gz}} \frac{\partial p_{vp}}{\partial T} = -\frac{1}{T} \frac{1}{AI^2} \left(AI \left(1 - \frac{\partial p_w}{\partial p_{gz}} \left(1 + L \frac{\rho_w}{K_w} \right) \right) + (p_{ad} - L\rho_w) \frac{\rho_w}{\rho_{vp}} \left(\frac{1}{K_w} \frac{\partial p_w}{\partial p_{gz}} - \frac{1}{p_{vp}} \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{gz}} \right) \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial T} \frac{\partial p_{vp}}{\partial T} = \frac{1}{T \cdot AI} \left(\frac{\partial p_{ad}}{\partial T} - L \left(\frac{\rho_w}{K_w} \frac{\partial p_w}{\partial T} - 3\alpha_w \rho_w \right) \right) - \frac{1}{T^2 \cdot AI^2} \left(\frac{RT}{K_H} - \frac{\rho_w}{\rho_{vp}} + T \left(\frac{R}{K_H} - \frac{\rho_w}{\rho_{vp}} A4 \right) \right) (p_{ad} - L\rho_w)$$

Dérivées secondes de la pression d'air dissous :

$$\frac{\partial}{\partial p_c} \frac{\partial p_{ad}}{\partial p_{gz}} = \frac{RT}{K_H} \frac{A2}{AI^2} \left(\frac{1}{p_{vp}} \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_c} - \frac{1}{K_w} \frac{\partial p_w}{\partial p_c} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial p_{gz}} \frac{\partial p_{ad}}{\partial p_{gz}} = \frac{RT}{K_H} \frac{A2}{AI^2} \left(\frac{1}{p_{vp}} \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{gz}} - \frac{1}{K_w} \frac{\partial p_w}{\partial p_{gz}} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial T} \frac{\partial p_{ad}}{\partial p_{gz}} = -R_{K_H} \frac{\rho_w}{\rho_{vp}} \frac{1}{AI} + \left(\frac{\rho_w}{\rho_{vp}} \right)^2 \frac{R}{K_H} \frac{A2}{AI^2} (1 + A3 \cdot T)$$

$$\frac{\partial}{\partial p_c} \frac{\partial p_{ad}}{\partial p_c} = \frac{RT}{K_H} \frac{\rho_w}{\rho_{vp}} \frac{1}{AI^2} \left(\frac{1}{p_{vp}} \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_c} - \frac{1}{K_w} \frac{\partial p_w}{\partial p_c} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial p_{gz}} \frac{\partial p_{ad}}{\partial p_c} = \frac{RT}{K_H} \frac{\rho_w}{\rho_{vp}} \frac{1}{AI^2} \left(\frac{1}{p_{vp}} \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{gz}} - \frac{1}{K_w} \frac{\partial p_w}{\partial p_{gz}} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial T} \frac{\partial p_{ad}}{\partial p_c} = \frac{R}{K_H} \frac{\rho_w}{\rho_{vp}} \frac{1}{AI^2} (1 + A3 \cdot T)$$

$$\frac{\partial}{\partial p_c} \frac{\partial p_{ad}}{\partial T} = \frac{1}{AI} \frac{\rho_w}{\rho_{vp}} \left(\frac{LR}{K_H} \frac{\rho_{vp}}{p_{vp}} \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_c} - \frac{1}{T} \frac{\partial p_{ad}}{\partial p_c} \right) - \frac{RT}{K_H} \frac{\rho_w}{\rho_{vp}} \frac{1}{AI^2} \left(\frac{LR}{K_H} \rho_{vp} - \frac{p_{ad}}{T} \right) \cdot A3$$

$$\frac{\partial}{\partial p_{gz}} \frac{\partial p_{ad}}{\partial T} = \frac{1}{AI} \frac{\rho_w}{\rho_{vp}} \left(\frac{LR}{K_H} \frac{\rho_{vp}}{p_{vp}} \frac{\partial p_{vp}}{\partial p_{gz}} - \frac{1}{T} \frac{\partial p_{ad}}{\partial p_{gz}} \right) - \frac{RT}{K_H} \frac{\rho_w}{\rho_{vp}} \frac{1}{AI^2} \left(\frac{LR}{K_H} \rho_{vp} - \frac{p_{ad}}{T} \right) \cdot A3$$

$$\frac{\partial}{\partial T} \frac{\partial p_{ad}}{\partial T} = \frac{1}{AI} \frac{\rho_w}{\rho_{vp}} \left(\frac{LR \rho_{vp}}{K_H} \left(\frac{1}{p_{vp}} \frac{\partial p_{vp}}{\partial T} - \frac{1}{T} \right) + \frac{p_{ad}}{T^2} - \frac{1}{T} \frac{\partial p_{ad}}{\partial T} \right) - \frac{RT}{K_H} \frac{\rho_w}{\rho_{vp}} \frac{1}{AI^2} \left(\frac{LR}{K_H} \rho_{vp} - \frac{p_{ad}}{T} \right) \cdot \left(A3 + \frac{1}{T} \right)$$

Annexe 5 Équivalence avec les formulations ANDRA

Afin de pouvoir s'insérer dans la plate-forme ALLIANCE, il est nécessaire d'être cohérent avec les formulations posées par l'ANDRA dans le document [bib11]. Nous proposons ici une équivalence entre les notations qui seraient dissemblables. Ces différences concernent uniquement l'écriture de :

- L'équation d'énergie
- La loi de Henry
- La diffusion dans le liquide
- La diffusion dans le gaz

Remarque concernant les enthalpies :

Il est nécessaire pour avoir cohérence entre les deux modèles que l'utilisateur de Code_Aster prenne : $h_{lq}^{m_0} = 0$ et $h_{vp}^{m_0} = L_0$.

A5.1 Équation d'énergie

Le tableau ci-dessus rappelle les deux formulations :

| Notations Code_Aster | Notations ANDRA |
|----------------------|---|
| h_{lq}^m | $= \frac{\phi_w}{\rho_w S_w n}$ |
| h_{vp}^m | $= \frac{\phi_v}{\rho_v (1 - S_w) n}$ |
| h_{as}^m | $= \frac{\phi_{as}}{\rho_{as} (1 - S_w) n}$ |
| \mathbf{M}_{lq} | $= \rho_w f_w$ |
| \mathbf{M}_{as} | $= \rho_{as} f_{as}$ |
| \mathbf{M}_{vp} | $= \rho_v f_v$ |

En réécrivant l'équation de l'énergie de Code_Aster avec ces notations , on trouve :

$$\begin{aligned} & \frac{d\phi}{dt} + Div \left(\phi_w \frac{f_w}{S_w n} + \phi_{as} \frac{f_{as}}{(1 - S_w) n} + \phi_v \frac{f_v}{(1 - S_w) n} \right) + Div(\mathbf{q}) - (T - T^0) \frac{d}{dt} [(1 - n) \rho_s C_s] \\ & + 3 \alpha_0 K_0 T \frac{d\varepsilon_v}{dt} + 3 \alpha_{lq}^m T \frac{dp_c}{dt} - 3 (\alpha_{lq}^m + \alpha_{gz}^m) T \frac{dp_{gz}}{dt} - 9 TK_0 \alpha_0^3 \frac{dT}{dt} \\ & = (\rho_w f_w + \rho_v f_v + \rho_{as} f_{as}) \mathbf{g} + \Theta \end{aligned}$$

La première ligne étant celle de l'ANDRA et les autres étant a priori négligeables.

A5.2 Loi de Henry

Dans la formulation de l'ANDRA, la formulation 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 $\omega_l^a = \rho_{ad} \cdot H$ s'exprime en Pa .

Dans la formulation de *Code_Aster*, on rappelle que la loi de Henry est exprimée sous la forme :

$$C_{ad}^{ol} = \frac{\rho_{ad}}{M_{ad}^{ol}} \quad \text{avec} \quad C_{ad}^{ol} = \frac{P_{as}}{K_H} \cdot K_H \quad \text{s'exprime en} \quad Pa \cdot m^3 \cdot mol^{-1} .$$

On a donc l'équivalence :

$$K_H = H \frac{M_w}{\rho_w}$$

A5.3 Diffusion de la vapeur dans l'air

Dans la formulation ANDRA le flux de vapeur d'eau dans l'air en fonction de la concentration de vapeur d'eau dans l'air ou de l'humidité relative est noté :

$$f_{Diff_v} = -D_v \cdot \nabla \omega_g^e$$

avec la concentration définie comme le rapport molaire dans le gaz : $\omega_g^e = \frac{n_v}{n_g}$.

Dans *Code_Aster*, ce même flux s'écrit : $f_{Diff_v} = F_{vp} \nabla C_{vp}$ avec le coefficient de Fick vapeur

$F_{vp} = \frac{D_{vp}}{C_{vp}(1-C_{vp})}$ et D_{vp} le coefficient de diffusion de Fick du mélange gazeux. C_{vp} est défini

comme le rapport des pressions tel que : $C_{vp} = \frac{P_{vp}}{P_{gz}}$.

La loi des gaz parfaits permet d'écrire que $C_{vp} = \omega_g^e$ donc $\nabla \omega_g^e = \nabla C_{vp}$ et $f_{Diff_v} = D_v \cdot \nabla C_{vp}$.
Donc l'équivalence *Code_Aster*/ANDRA s'écrit simplement :

$$F_{vp} = D_v .$$

A5.4 Diffusion de l'air dissous dans l'eau

Dans la formulation ANDRA le flux d'air dissous dans l'eau s'exprime

$$f_{a_{ds}} = D_a \cdot \nabla \omega_l^a$$

avec $\omega_l^a = \frac{\rho_{ad}}{M_{ad}^{ol}}$.

Dans *Code_Aster*, ce même flux s'écrit : $f_{a_{ds}} = F_{ad} \nabla C_{ad}$ avec le coefficient de Fick air-dissous

$F_{ad} = \frac{D_{ad}}{C_{ad}(1-C_{ad})}$ et D_{ad} le coefficient de diffusion de Fick du mélange liquide. C_{ad} est défini tel

que : $C_{ad} = w_l^a$. Donc :

$$F_{ad} = D_a .$$