Panorama des outils disponibles pour réaliser des calculs de structure de Génie Civil en béton

Résumé :

L'objectif de ce document est de fournir une vision d'ensemble des possibilités de modélisation qui s'offrent à l'utilisateur en fonction du type d'analyse qu'il souhaite mener en Génie Civil. Différents choix sont toujours possibles et le but de ce document n'est pas de se substituer à l'analyse de l'ingénieur mais bien de lui permettre de choisir plus facilement les options de modélisation, en fonction des outils disponibles, et de l'orienter vers des documents plus spécifiques.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Table des Matières

1 Introduction....3
1.1 Le type d'analyse à mener....3
1.2 Le type de modélisation à utiliser :....4
1.3 La loi de comportement....4
2 Choix possibles pour les calculs thermiques....4
3 Choix possibles pour les calculs d'hydratation....5
4 Choix possibles pour les calculs de séchage....6
5 Choix possibles pour les calculs mécaniques (statiques ou dynamiques)....6
5.1 Choix de modélisation pour le béton armé et/ou précontraint....6
5.1.1 Modélisation du béton par des éléments volumiques 3D....7
5.1.2 Modélisation du béton par des éléments surfaciques....10
5.1.3 Modélisation du béton par des éléments de structures....11
5.2 Lois de comportement utilisables pour le béton :....13
5.2.1 Description des déformations différées :....13
5.2.2 Description de l'endommagement/fissuration du béton....14
5.2.3 Description de l'endommagement/fissuration du béton armé....17
5.2.4 Compatibilité lois de comportement/modélisation....18
5.3 Lois de comportement utilisables pour l'acier....20
5.4 Modèles de comportement utilisables pour la liaison acier-béton....21
5.5 Modélisation de l'interaction sol – structure et Interaction structure - sol - structure....21
6 Divers....23
6.1 Calcul de ferraillage....23
6.2 Macro d'aide à l'identification des paramètres matériaux....23
6.3 Pré / Post-traitement....23
6.3.1 Vérification mise en donnée....23
6.3.2 Post-traitements....24
7 Ce que Code_Aster ne sait pas (encore) faire....26

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1 Introduction

Derrière le mot calcul de Génie Civil se cachent à la fois des calculs sur des structures aux dimensions et aux caractéristiques très variées (éprouvette, poutres, bâtiment,...) mais surtout des calculs dont la finalité ou les informations recherchées sont très différentes : dimensionnement d'une structure, prévision du vieillissement à long terme, étude du risque de fissuration, vérification de la tenue sismique d'une structure, réévaluation des marges. Charge au modélisateur de trouver le meilleur compromis entre la complexité, le coût de l'étude et la précision ou la représentativité des résultats recherchés, en choisissant correctement le type d'analyse, sa modélisation éléments finis et ses modèles de comportement, sachant qu'un grand choix est disponible dans Code_Aster.

1.1 Le type d'analyse à mener

Le choix des opérateurs s'effectue en fonction : du type de phénomène modélisé (thermique, hydrique, mécanique...) et du type d'information recherché (information locale ou globale, état stationnaire ou étude du transitoire,...), du type de chargement (statique, dynamique), des non-linéarités à modéliser (comportement, grandes déformations, chargement,...). Le choix doit être fait parmi les opérateurs suivants :

- un calcul thermique linéaire (THER_LINEAIRE) [R5.02.01] pour estimer la température du béton dans les cas linéaires ;
- un calcul de thermique non-linéaire (THER_NON_LINE [R5.02.02]), lorsque les propriétés ou les conditions aux limites ne sont pas linéaires, mais aussi pour modéliser la thermo-hydratation du béton ou l'évolution du séchage (sous l'effet du gradient hydrique) ;
- un calcul statique linéaire (MECA_STATIQUE [U4.51.01]) dans les cas où l'on considère le béton élastique et en l'absence de toute non-linéarité ;
- un calcul statique non-linéaire (STAT_NON_LINE, [R5.03.01]), dès lors que l'on veut prendre en compte des non-linéarités de comportement (fluage, endommagement,...) ou de chargement (précontrainte, contact,...) ;
- un calcul thermo-mécanique, en chaînant un calcul thermique (linéaire ou non) résolu avec THER_LINEAIRE ou THER_NON_LINE et un calcul statique (linéaire ou non) résolu avec MECA_STATIQUE ou STAT_NON_LINE;
- un calcul couplé Thermo-Hydro-Mécanique type milieu poreux, accessible via STAT_NON_LINE, pour étudier notamment les échanges d'eau ou de gaz à travers une paroi en béton (cf. [R7.01.10] et [R7.01.11]) ;
- un calcul de dynamique vibratoire avec l'opérateur DYNA_VIBRA [U4.53.03] qui peut être de type transitoire ou harmonique, sur base physique ou sur base modale (en faisant appel selon le cas, aux opérateurs historiques DYNA_TRAN_MODAL, DYNA_LINE_TRAN et DYNA_LINE_HARM), avec la possibilité de prendre en compte certaines non-linéarités localisées type choc ou frottement ;
- un calcul type méthode spectrale par synthèse modale COMB_SISM_MODAL [R4.05.03], pour calculer la réponse dynamique à des mouvements imposés uniques ou multiples et dimensionner une structure ;
- un calcul dynamique transitoire directe avec DYNA_NON_LINE [R5.05.05] si on veut modéliser des non-linéarités localisées type frottement ou des grands déplacements ou des comportements non-linéaires ;
- un calcul de type impact en dynamique explicite en servant uniquement d'interface pour appeler EUROPLEXUS (code de référence en dynamique rapide) via la commande CALC_EUROPLEXUS [U7.03.10] ;
- un calcul d'écoulement de fluide dans une structure en béton fissurée (en 2D), avec MACR_ECREVISSE [U7.03.41].

Notons pour terminer, que *Code_Aster* permet de faire du calcul déterministe, mais que des procédures ont été mises en place pour permettre de faire assez facilement des calculs mécano-probabilistes (cf. **[U2.08.05] Propagation des incertitudes et courbe de fragilité**).

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1.2 Le type de modélisation à utiliser :

Il est possible d'utiliser :

- des éléments volumiques 3D [R3.01.00] ou surfaciques 2D, quand cela est possible, en ayant recours à des hypothèses simplificatrices telles que déformations planes, contraintes planes ou axisymétrie ;
- des éléments de type plaque (mince pour les DKT, DST, Q4G [R3.07.03] ou épaisse pour les Q4GG [R3.07.09]), de type membranaire (GRILLE_MEMBRANE, GRILLE_EXCENTREE, MEMBRANE, [R3.08.07]) ou de coques volumiques (COQUE_3D [R3.07.04], SHB [R3.07.07] ou [R3.07.08]),...
- des éléments linéiques à l'aide d'élément poutre droite de type Euler (POU_D_E) , ou des poutres de type Timoshenko, droite (POU_D_T) (cf. [R3.08.01]), des poutres multifibres en petits ou en grands déplacements (POU_D_EM [R3.08.08], POU_D_TGM [R3.08.09]).

Ces modélisations peuvent bien sûr être utilisées seules ou être combinées.

Pour aider l'utilisateur à faire son choix (notamment en ce qui concerne l'utilisation des éléments de structures), le lecteur pourra se reporter au document **[U2.02.01] Notice d'utilisation des éléments plaques, coques, coques volumiques SHB, grilles et membranes** ou au document **[U2.06.10] Réalisation d'une étude de génie civil sous chargement sismique**. Par ailleurs, le chapitre 5 de ce document, détaille comment représenter les armatures et les câbles de précontrainte, selon le choix fait pour représenter le béton.

1.3 La loi de comportement

Celle-ci est à choisir en fonction des phénomènes qu'il est nécessaire de prendre en compte, en ayant conscience de leurs limites, de la difficulté d'identifier des paramètres matériaux réalistes lorsqu'on commence à chercher à obtenir des informations très fines, de la robustesse de la loi et des impacts en termes de temps de calcul,... Les caractéristiques des principales lois disponibles sont résumées dans ce document pour faciliter le choix de l'utilisateur.

Les chapitres suivants ont pour but de lister les principaux choix possibles notamment en termes de modélisation et de lois de comportement, ainsi que les combinaisons, afin de faciliter le choix.

2 Choix possibles pour les calculs thermiques

La tableau suivant précise les modélisations possibles en fonction du type d'analyse.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Modélisation	Type d'analyse		Type d'élément		Exemple
	Linéaire	Non-Linéaire	Linéaire	Quadratique	
3D/3D_DIAG	ok	ok	ok	ok	FORMA41
PLAN/PLAN_DIAG	ok	ok	ok	ok	FORMA21
AXIS/AXIS_DIAG	ok	ok	ok	ok	FORMA30
COQUE	ok	nook	ok	ok	HPLA100
COQUE_PLAN	ok	nook	nook	ok	ZZZZ110
COQUE_AXIS	ok	nook	nook	ok	

Tableau 2-1: Types d'analyse possibles en thermique

Remarques :

Les modélisations 3D_DIAG, PLAN_DIAG et AXIS_DIAG, qui correspondent à l'utilisation d'une matrice de masse lumpée ou diagonalisée (cf. [R3.06.07]), donnent des résultats plus précis que les modélisations classiques en présence de choc thermique et pour les éléments linéaires.
Pour les coques, la variation de température dans l'épaisseur est forcément parabolique (cf. [R3.11.01]).
Tous les chargements ne sont pas applicables à la modélisation COQUE, vérifier avant utilisation [U4.44.02].
Pour poursuivre avec un calcul mécanique, on conseille :
*- d'utiliser préférentiellement des éléments linéaires pour résoudre le problème thermique avec la modélisation XXXX_DIAG , et des éléments quadratiques pour le problème mécanique de préférence sous-intégrés (cf. **[U2.01.10] Notice d'utilisation sur le choix des éléments finis**).*
- de bien vérifier que la loi de comportement utilisée prend en compte la déformation thermique , et que la modélisation utilisée accepte bien les variables de commande et notamment la thermique. Lorsqu'elle est prise en compte, la dilatation thermique est sphérique et vaut $\varepsilon_{th} = \alpha \Delta T \, \boldsymbol{I}_d$ *. A l'heure actuelle, les éléments volumiques et plan, les éléments DKT et DKTG et les poutres multifibres (POU_D_EM et POU_D_TGM) supportent la température comme variable de commande.*
Il n'existe pas dans Code_Aster de modèle décrivant spécifiquement l'endommagement d'origine thermique.

3 Choix possibles pour les calculs d'hydratation

Il existe un seul modèle d'hydratation dans *Code_Aster* qui permet de décrire le dégagement de chaleur ainsi que le durcissement, cf. [R7.01.12]. Il est résolu via l'opérateur THER_NON_LINE, et le comportement 'THER_HYDR'. Le modèle ne doit comporter que le béton, modélisé à l'aide d'éléments volumiques ou surfaciques, de préférence linéaires. Les modélisations conseillées sont 3D_DIAG, PLAN_DIAG et AXIS_DIAG (mais 3D, PLAN ou AXIS sont également possibles). Des pas de temps suffisamment petits doivent être utilisés au jeune âge (de l'ordre de l'heure jusqu'au pic d'échauffement thermique, puis les pas de temps peuvent être augmentés progressivement) pour obtenir une solution de bonne qualité, car une discrétisation explicite de la source de chaleur est utilisée.

La température et l'hydratation peuvent ensuite être prises en compte dans le calcul mécanique sous forme de variables de commande (TEMP et HYDR). Dans ce cas, il est conseillé de résoudre le problème thermique avec des éléments linéaires.
Un exemple de résolution d'un tel problème est traité dans le cas-test FORMA41.

Remarque :

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Il est possible de ne pas résoudre le problème de thermo-hydratation, et de définir un champ d'hydratation de manière analytique à l'aide des commandes CREA_CHAM et CREA_RESU (Dans ce cas, l'échauffement dû à la réaction de thermo-hydratation est négligé). Ainsi on utilise couramment la formule suivante, issue d'un calage LCPC :

$h = \frac{t}{b + t}$ *, avec* $b = 1684800\,s.$ *, si* t *est le temps exprimé en seconde.*

(cf. test SSLA103 pour un exemple de mise en donnée).

4 Choix possibles pour les calculs de séchage

Il est possible de modéliser le séchage du béton sous l'effet du gradient hydrique (hypothèse simplificatrice qui permet de ne modéliser que le séchage par diffusion et pas par advection par exemple) avec l'opérateur THER_NON_LINE, (cf. [R7.01.12]). Le modèle ne doit comporter que le béton, modélisé à l'aide d'éléments volumiques ou surfaciques, de préférence linéaires (surtout si on enchaîne avec un calcul mécanique). Les modélisations conseillées sont 3D_DIAG, PLAN_DIAG et AXIS_DIAG (mais 3D, PLAN ou AXIS sont également possibles). 4 lois sont disponibles pour représenter l'évolution du coefficient de diffusion D en fonction de la concentration en eau et éventuellement de la température. Les expressions de chacune sont données dans [U4.43.01].

- SECH_MENSI, où D est fonction de la concentration en eau ;
- SECH_GRANGER qui est équivalente à SECH_MENSI mais qui prend en compte l'activation thermique (c'est-à-dire l'accélération du séchage lorsque la température augmente) ;
- SECH_BAZANT, où D est fonction de l'humidité (reliée à la concentration en eau par la fonction de sorption) ;
- SECH_NAPPE qui permet de définir une évolution quelconque pour D sous forme d'une nappe fonction de la concentration en eau et de la température.

Le séchage peut ensuite être pris en compte dans le calcul mécanique sous forme d'une variable de commande SECH, qui correspond à la concentration en eau dans le béton.

Remarque

Pour des cas de séchage plus complexes (par exemple séchage sous l'effet d'un gradient de pression), il est nécessaire d'avoir recours à une modélisation Thermo-Hydro-Mécanique qui traite les équations de la mécanique des milieux continus en utilisant la théorie des milieux poreux éventuellement non saturés et en considérant que les phénomènes mécaniques, thermiques et hydrauliques sont complètement couplés, cf.[R7.01.10] et ***[U2.04.05] Notice d'utilisation du modèle THM****.*
L'identification des paramètres matériaux se fait à partir d'une courbe de perte de masse. Un exemple est donné pour la loi SECH_GRANGER dans le test TTNV101.

5 Choix possibles pour les calculs mécaniques (statiques ou dynamiques)

Un grand choix de modélisations mais aussi de lois de comportement est disponible dans *Code_Aster* pour les calculs mécaniques. Charge à l'utilisateur de définir la stratégie la plus efficace en fonction des caractéristiques de la structure étudiée (enceinte, réservoir, dalle, poutre...), des chargements appliqués (thermiques, symétriques, 3D...), de l'information recherchée (comportement global, charge limite, fissuration, fluage,...) mais aussi de la rapidité d'exécution attendue (complexité de mise en œuvre, difficulté de convergence, temps de calcul,...). Le but de ce chapitre n'est pas de donner des conseils sur le choix de la modélisation la plus adaptée, mais de donner une vue synthétique des modélisations, des lois de comportement et des combinaisons possibles pour faciliter le choix de l'ingénieur.

5.1 Choix de modélisation pour le béton armé et/ou précontraint

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Pour modéliser le béton uniquement, tous les types d'éléments sont utilisables. Nous ne faisons ici que la synthèse des combinaisons possibles - ou en tout cas classiquement utilisées - pour représenter le béton contenant des aciers. Dans la suite, le point d'entrée de chaque paragraphe correspond au choix qui est fait pour décrire le béton : volumique, surfacique ou à l'aide d'éléments de structure. Pour les détails pratiques, sur la mise en œuvre de calculs avec les câbles de précontrainte, et notamment l'utilisation des opérateurs DEFI_CABLE_BP et CALC_PRECONT, le lecteur est invité à consulter le document **[U2.03.06] Réalisation d'une étude Génie Civil avec câbles de précontrainte**.

5.1.1 Modélisation du béton par des éléments volumiques 3D

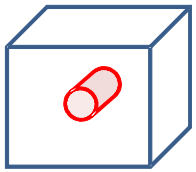
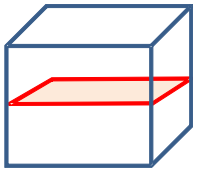
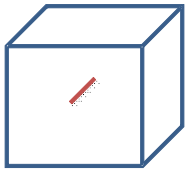
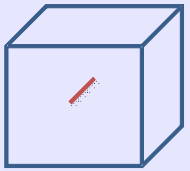
Les modélisations et éléments possibles pour le béton sont :

- les modélisations 3D ou 3D_SI dans le cas général, sachant que tous les éléments isoparamétriques 3D (hexaèdre, tétraèdre, pentaèdre, pyramide...) sont utilisables en linéaire ou en quadratique pour la modélisation 3D, alors que la modélisation 3D_SI ne permet d'utiliser que des éléments hexaédriques (linéaires ou quadratiques) et les tétraèdres quadratiques. Les éléments quadratiques sont plus coûteux mais donnent des résultats de meilleure qualité. L'utilisation de la sous-intégration permet néanmoins de faire baisser les temps calculs. Dans le cas d'un calcul chaîné thermo-mécanique, il est conseillé d'utiliser des éléments quadratiques sous-intégrés (cf. **[U2.01.10], Notice d'utilisation sur le choix des éléments finis**).

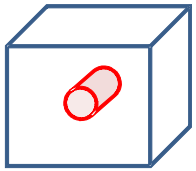
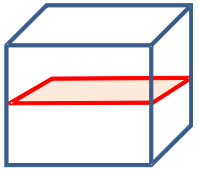
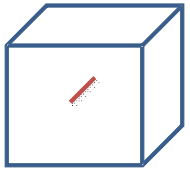
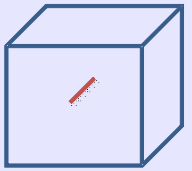
- la modélisation 3D_GRAD_VARI dans le cas où on veut utiliser un modèle d'endommagement non-local à gradient d'endommagement (cf. [R5.04.01]). Dans ce cas, les éléments doivent être quadratiques.

Le tableau suivant synthétise les trois solutions possibles pour représenter les armatures et les câbles de précontrainte quand le béton est modélisé en $3D$. A titre indicatif, nous avons ajouté la modélisation CABLE_GAINE qui n'est valable que pour les câbles de précontrainte.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

	3D (ou 3D_SI)  3D/3D	GRILLE_MEMBRANE / MEMBRANE  3D/2D	BARRE POU_D_E  3D/1D	CABLE_GAINE  3D/1D
Maillage utilisable	Tous les éléments volumiques, linéaires ou quadratiques	Triangles ou quadrangles, linéaires ou quadratiques	SEG2	SEG3
Représentation d'une liaison acier-béton parfaite	Nœuds béton et nœuds acier identiques	Nœuds béton et nœuds acier identiques	Nœuds béton et nœuds acier identiques ou quelconque avec DEFI_CABLE_BP[1] (BARRE uniquement)	Utilisation loi CABLE_GAINE_FROT/TYPE='PARFAIT'
Représentation d'une liaison glissante	non pris en compte	non pris en compte	non pris en compte	Utilisation loi CABLE_GAINE_FROT/TYPE='GLISSANT'
Représentation d'une liaison frottante	non pris en compte	non pris en compte	non pris en compte	Utilisation loi CABLE_GAINE_FROT/TYPE='FROTTANT'
Représentation d'une liaison acier-béton dégradable[2]	Introduction d'éléments 3D_INTERFACE + loi CZM_LAB_MIX entre mailles acier et béton (maillage quadratique obligatoire	Introduction d'éléments 3D_INTERFACE+ loi CZM_LAB_MIX entre mailles acier et béton (maillage quadratique obligatoire[3]	non pris en compte	non pris en compte

1 Veiller toutefois à avoir un niveau de discrétisation comparable entre acier et béton.
2 Voir §5.4 pour plus de détails.
3 Modélisation MEMBRANE uniquement.

	3D (ou 3D_SI)	GRILLE_MEMBRANE / MEMBRANE	BARRE POU_D_E	CABLE_GAINE
	 3D/3D	 3D/2D	 3D/1D	 3D/1D
Possibilité de mise en tension (câbles de précontrainte)	Déformations initiales via EPSI_INIT ou déformation thermique fictive ou pression équivalente	Déformations initiales via EPSI_INIT ou déformation thermique fictive ou pression équivalente	DEFI_CABLE_BP/ CALC_PRECONT (modélisation BARRE uniquement)	DEFI_CABLE_BP/ CALC_PRECONT
Coût en termes de maillage	NS	S	M / S[4]	S
Représentativité globalement/localement	S / S	S / M	S / L	S / M
Exemple cas-test		FORMA40 (liaison parfaite) SSNS110 avec CZM	SSLX103(armatures) SSNV164 (câble)	ZZZZ347

Légende :

S	satisfaisant
M	moyen
NS	non satisfaisant

Tableau 5.1.1-1 : Combinaisons possibles pour représenter du béton armé et/ou précontraint avec des éléments 3D

Remarques :

La représentation des aciers par des éléments linéiques noyés dans du béton modélisé en $3D$, posent des problèmes mathématiques et numériques. Toutefois les résultats restent corrects tant que l'on ne raffine pas trop le maillage. De fait, leur utilisation avec des modèles d'endommagement induit souvent un endommagement prématuré non réaliste le long de ces aciers.

La modélisation des câbles de précontrainte lorsque l'acier est modélisé en $3D$ ou avec des éléments de type MEMBRANE, n'a été que peu testée jusqu'à présent.

4 Sans DEFI_CABLE_BP/Avec DEFI_CABLE_BP

5.1.2 Modélisation du béton par des éléments surfaciques

Les modélisations et éléments possibles pour le béton sont :
- Modélisation D_PLAN ou D_PLAN_SI (déformations planes, donc pièces épaisses),
- Modélisation C_PLAN ou C_PLAN_SI (contraintes planes, donc pièces de faibles épaisseurs),
- Modélisation AXIS ou AXIS_SI (axisymétrie).

(cf. [U3.13.01 pour les éléments « classiques » et [U3.13.05] pour les éléments sous-intégrés).
Les éléments utilisables peuvent être indifféremment des triangles ou des quadrangles, linéaires ou quadratiques (préférer XX_SI avec éléments quadratiques dans le cas d'un calcul chaîné type thermo-mécanique).

- Modélisation D_PLAN_GRAD_VARI ou AXIS_GRAD_VARI dans le cas où on veut utiliser un modèle d'endommagement non-local à gradient d'endommagement (cf. [R5.04.01]). Dans ce cas, les éléments doivent être quadratiques (triangles ou quadrangles).

Le tableau suivant synthétise dans ce cas, les solutions possibles pour représenter les armatures et les câbles de précontrainte.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

	D_PLAN(_SI) C_PLAN(_SI) AXIS(_SI)	2D_BARRE
Maillage utilisable	Triangle ou quadrangle, linéaire ou quadratique	SEG2
Représentation d'une liaison acier-béton parfaite	Nœuds béton et nœuds acier identiques	Nœuds béton et nœuds acier identiques
Représentation d'une liaison glissante	non pris en compte	non pris en compte
Représentation d'une liaison frottante	non pris en compte	non pris en compte
Représentation d'une liaison acier-béton dégradable	Introduction d'éléments _PLAN_JOINT ou AXIS_JOINT + loi JOINT_BA entre mailles acier et béton (maillage linéaire obligatoire)	non pris en compte
Possibilité de mise en tension (câbles de précontrainte)	Déformations initiales via EPSI_INIT ou déformation thermique fictive ou pression équivalente	Déformations initiales via EPSI_INIT ou déformation thermique fictive ou pression équivalente
Coût en termes de maillage	S	S / S
Représentativité globalement/localement	S / S	S / NS
Exemple cas-test	SSNA112	SSNL112

Légende :

S satisfaisant

M moyen

NS non satisfaisant

Tableau 5.1.2-1 : Combinaisons possibles pour représenter du béton armé et/ou précontraint avec des éléments surfaciques

5.1.3 Modélisation du béton par des éléments de structures

Les éléments de structure sont des éléments particuliers, qui moyennant un certain nombre d'hypothèse permettent de décrire les déplacements et déformations d'une structure particulière en 3D, tout en la modélisant en 2D ou en 1D. Pour y arriver, le déplacement de la structure est décrit par des degrés de liberté de déplacements (classiques) mais aussi par une ou des rotations. Cela couvre traditionnellement les éléments dits de plaque, coque ou poutre, cf. [R3.07.03] ou [R3.08.01]. Ils sont très couramment utilisés pour les études dynamiques.
Le Tableau 5.1.3-1 permet de savoir comment modéliser les armatures et les câbles de précontrainte lorsque le béton est modélisé avec des éléments de structures, alors que le Tableau 5.1.3-2 donne l'équivalent dans le cas où l'on a choisi de représenter le béton armé à l'aide d'un modèle global.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Béton	Armatures	Câbles de précontrainte
Choix 1 : modélisation surfacique **Modèle** : DKT (plaque ou coque mince) **Maillage** : - triangles ou quadrangles, linéaires	**Modélisation surfacique** **Modèle** : GRILLE_EXCENTREE (une maille par direction d'armatures) **Maillage** : - triangles ou quadrangles, linéaires **Exemple** : test FORMA40	**Modélisation linéique** **Modèle :** BARRE **Maillage** : SEG2, nœuds acier et béton identiques ou maillage acier/béton quelconque si on utilise DEFI_CABLE_BP **Liaison acier-béton** : parfaite **Mise en tension** : avec DEFI_CABLE_BP/CALC_PRECONT **Exemple** : test SSNP108
Choix 2 : modélisation linéique **Modèle** : POU_D_TGM, POU_D_EM (poutres multifibres) **Maillage** : SEG2	**Modélisation linéique** Possible en affectant des comportements différents aux groupes de fibres de type béton et acier. **Exemple** : test SDLL130	(Application d'un chargement de compression équivalent)

Tableau 5.1.3-1: Combinaisons possibles pour représenter du béton armé et/ou précontraint avec des éléments de structure

Béton + armatures	Câbles de précontrainte
Choix 1 : modélisation surfacique Modélisation du béton armé sous forme d'éléments de plaque (élément linéaire), modélisation DKTG, en utilisant une loi de comportement globale GLRC_DM, GLRC_DAMAGE ou DHRC **Exemple** : test SSL106	**Choix 1 : modélisation linéique** **Modèle** : BARRE **Maillage** : SEG2, nœuds acier et béton identiques ou maillage acier/béton quelconque si on utilise DEFI_CABLE_BP **Liaison acier-béton** : parfaite **Mise en tension** : avec DEFI_CABLE_BP/CALC_PRECONT
Choix 2 : modélisation linéique Modélisation du béton armé à l'aide d'éléments 1D, linéaire, modélisation POU_D_E ou POU_D_T, en utilisant une loi de comportement élastique **Exemple** : test SDLL130	(Application d'un chargement de compression équivalent)

Tableau 5.1.3-2: Combinaisons possibles pour représenter du béton armé et/ou précontraint avec des éléments de structure à l'aide d'un modèle global

Remarques :

- *Il existe d'autres éléments de structures susceptibles de modéliser le béton et notamment les éléments COQUE_3D , SHB , COQUE_AXI ,... Il n'y a a priori aucune contre-indication à les utiliser mais ils n'ont pas été validés sur ces applications.*
- *Lorsque plusieurs types de modélisations sont mélangés dans une même structure, il est nécessaire de les relier. Les moyens de raccord (à définir sous AFFE_CHAR_MECA [U4.44.01]) les plus fréquents en Génie Civil, sont les suivants :*

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- *cas encastré lorsque les maillages sont confondus ;*
- *raccord entre éléments volumiques/surfaciques et des poutres : LIAISON_ELEM=_F(OPTION= '3D_POU' ou '2D_POU') [R3.03.03] ;*
- *raccord dalle-poteau LIAISON_ELEM=_F(OPTION = 'PLAQ_POUT_ORTH') ;*
- *liaison entre une coque et une poutre : LIAISON_ELEM=_F(OPTION='COQ_POU'), [R3.03.06].*

Pour les autres cas de raccord, le mot-clé LIAISON_DDL est un outil pratique .

- *Pour des conseils pratiques sur les questions de maillage et de mise en précontrainte des aciers par DEFI_CABLE_BP/CALC_PRECONT se reporter au document* ***[U2.03.06] Réalisation d'une étude génie civil avec câbles de précontrainte****.*
- *Des conseils pour choisir au mieux le type de modélisation dans le cas d'une étude sous chargement sismique sont disponibles dans la doc* ***[U2.06.10] Réalisation d'une étude de Génie Civil sous chargement sismique****.*

5.2 Lois de comportement utilisables pour le béton :

Les tableaux ci-dessous recensent les principales lois développées spécifiquement pour décrire le béton, en distinguant les phénomènes considérés. Les principales caractéristiques de ces lois sont indiquées pour permettre de repérer facilement la loi la plus adaptée au problème considéré, mais il est fortement conseillé de se référer à la documentation de référence avant toute utilisation.

5.2.1 Description des déformations différées :

	BETON_GRANGER_V [R7.01.01]	BETON_GRANGER [R7.01.01]	BETON_UMLV [R7.01.06]	BETON_BURGER [R7.01.35]	FLUA_PORO_BETON [R7.01.30]
Fluage propre	ok	ok	ok	ok	ok
Fluage de dessiccation	nook	nook	ok	ok	ok
Dilatation thermique/ Retrait endogène/ Retrait de dessiccation	nook	nook	ok	ok	ok
Activation thermique	ok	nook	nook	ok	ok
Influence du « vieillissement »(hydratation, polymérisation,...)	ok	nook	nook	nook	nook
Influence de l'âge du béton au moment du chargement	nook	nook	nook	nook	nook
Influence de la teneur en eau	ok	ok	ok	ok	ok

Tableau 5.2.1-1: Principales caractéristiques des différentes lois de fluage

Plusieurs générations de modèles sont disponibles dans *Code_Aster*, mais tous les modèles ont pour objectif de décrire proprement le fluage à long terme : ils ne cherchent pas à reproduire précisément ce qui se passe au jeune âge, où les couplages entre les phénomènes sont semble-t-il, plus importants. Le modèle le plus abouti aujourd'hui est le modèle BETON_BURGER, dans la mesure où

- le modèle de BETON_GRANGER aboutit à une saturation assez rapide des déformations de fluage,
- le modèle BETON_UMLV suppose que les déformations différées évoluent de manière linéaire à long terme, ce qui conduit généralement à les surestimer de façon importante. De plus, le coefficient de Poisson apparent n'est pas maîtrisé, et peut évoluer de façon anormale, y compris devenir négatif.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- le modèle BETON_BURGER permet de décrire l'ensemble des comportements et notamment de retrouver une évolution logarithmique en fonction du temps qui semble un phénomène très couramment observé.
- Le modèle FLUA_PORO_BETON est issu des travaux du LMDC et du CIH sur le comportement des barrages. Il s'appuie sur une formulation poro-mécanique et ressemble beaucoup à BETON_BURGER dans la théorie . Il appartient à un ensemble de modèle s pouvant être couplés Fluage + Endommagement + RAG/RSI.

Remarque :

A l'heure actuelle, aucune loi de fluage réglementaire n'est disponible dans le code. Toutefois, si la déformation de fluage à modéliser se limite à une déformation sphérique ($\varepsilon_{fl}=C\times I_d$), il est possible de la modéliser en utilisant une variable de commande. Si elle est proportionnelle à la déformation imposée, il est possible d'utiliser un module d'Young variable.

5.2.2 Description de l'endommagement/fissuration du béton

Pour décrire la dégradation du comportement, il existe plusieurs catégories de modèles. Dans *Code_Aster*, trois types sont disponibles :

- des modèles de plasticité (qui introduisent des déformations irréversibles, via la déformation plastique cumulée p),
- des modèles d'endommagement (qui introduisent une variable scalaire D ou un tenseur B , qui vient diminuer la rigidité du matériau)
- des modèles de zones cohésives, qui permettent de représenter explicitement les fissures, mais à la condition que l'utilisateur ait introduit a priori dans le maillage les chemins de fissuration potentielles à l'aide d'éléments d'interface (XX_INTERFACE, [R3.06.13]. ou **[U2.05.07] Notice d'utilisation des modèles de zones cohésives**).

Rappelons que, dès lors que le modèle est adoucissant (c'est-à-dire que la contrainte diminue à partir d'un certain niveau de déformation), si aucun traitement spécifique n'est effectué, la solution obtenue est dépendante du maillage, d'une part parce que la manière dont est maillée la structure oriente la direction de propagation de l'endommagement et d'autre part, car le faciès d'endommagement et la réponse globale dépendent de la tailles des mailles (plus les mailles sont petites, plus il est facile de les casser). Ce phénomène est valable à la fois pour la plasticité et l'endommagement. Trois méthodes permettent de régulariser la réponse numérique. La régularisation énergétique proposée par Hillerborg à la fin des années 70 permet uniquement de limiter la dépendance à la taille de maille mais n'agit pas sur la dépendance à l'orientation du maillage. La modélisation non-locale GRAD_VARI (qui fait intervenir le gradient d'endommagement) permet quant à elle de régulariser le problème en « étalant » la zone endommagée sur plusieurs mailles. Toutefois, cela implique d'avoir des maillages suffisamment fins (idéalement 5 mailles dans la longueur caractéristique).
Les modèles de zones cohésives quant à eux obligent l'utilisateur à postuler les chemins de fissuration potentielles.

Signalons également que les modèles de fissuration sont des modèles toujours compliqués à mettre en œuvre, et qui pose des problèmes de robustesse (même si les modèles arrivent généralement à atteindre le pic de contrainte sans trop de difficultés). Ils ne sont donc à utiliser que lorsque c'est nécessaire, ou à interpréter de façon prudente (surtout sur les phases post-pic). Pour toutes ces question de robustesse, il convient de se reporter aux notices **[U2.05.06] Réalisation de calculs d'endommagement en quasi-statique** et **[U2.05.07] Notice d'utilisation des modèles de zones cohésives** pour obtenir des conseils sur la façon de mener un calcul.

Le tableau suivant donne une vision synthétique des caractéristiques des différents modèles pour faciliter le choix de celui-ci.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Phénomènes	BETON_DOUBLE_DP [R7.01.03]	MAZARS [R7.01.08]	ENDO_FISS_EXP [R5.03.28] GRAD_VARI	ENDO_ISOT_BETON [R7.01.04]	ENDO_ORTH_BETON [R7.01.09]	ELAS+CZM_OUV_MIX ELAS+CZM_EXP_MIX [R7.02.11]	BETON_RAG [R7.01.26]	ENDO_PORO_BETON [R7.01.30]	BETON_REGLE_PR (X_PLAN ou DKT)	MAZARS_GC (1D ou C_PLAN) [R5.03.09]
Grandeur représentant la fissuration (et variable interne associée) [5]: $p_{t,c}$: plasticité $D_{t,c}$: endommagement scalaire $\boldsymbol{B}_{t,c}$: endommagement tensoriel δ_n : saut de déplacement Elas: élasticité non-linéaire	p_t et p_c (V1 et V2)	D (V1)	D_t (V1)	D_t (V1)	$\boldsymbol{B}_t$ (V1 à V6) et D_c (V7)	δ_n (V7)	$\boldsymbol{B}_t$ (V15 à V20) et D_c (V21)	$\boldsymbol{B}_t$ Traction (V80 à V82) et D_c compres. (V95)	Elas	D (V3)
Nombre de paramètres (hors élasticité)	6(+3)	6	3(+3)	3	6	4	31(+2)	4(+11)	4	6(+2)
Modélisations disponibles : L : locale GV : GRAD_VARI	L	L	GV	L/GV	L	so	L	L	so	L
Régularisation énergétique incluse[6]	ok	nook	so	nook	nook	so	ok	ok	nook	nook
Endommagement en traction	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
Endommagement en compression	ok	ok	ok [7]	ok [7]	ok	nook (élastique)	ok	ok	ok	ok
Comportement en cisaillement	ok	ok	ok	ok	ok	nook	ok	ok	nook	so / ok
Restauration de rigidité en compression	ok	nook	nook	ok	ok	ok	ok	ok	nook	ok (1D)
Déformations résiduelles (plastiques)	ok	nook	nook	nook	nook	nook	nook	ok	nook	nook
Paramètres variables avec la température	ok	ok	nook	nook	nook	nook	nook	nook	nook	nook
Description de la Réaction gonflement interne (RAG/RSI)	nook	**nook**	nook	nook	nook	nook	RAG	RAG/ RSI[8]	nook	nook

5 L'indice t ou c permet de distinguer la variable utilisée pour décrire la dégradation du béton en traction ou en compression, lorsque les mécanismes sont différents
6 Valable uniquement pour les modèles locaux
7 Quasi-fragile après σ_c

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Couplage avec d'autres lois via KIT_DDI : G : BETON_GRANGER **FLUA** :FLUA_PORO_BETON UMLV : BETON_UMLV	G	UMLV	nook	UMLV	nook	nook	ok[9]	FLUA[10]	nook	nook
Type de chargement adapté : M : monotone C : cyclique I: impact	M	M	M	M/C	M/C	M	M	M/C	M	C/M
Niveau de dégradation atteignable : - M : Modéré - R : Ruine	M	M	R	R	M	R	M	M	M	M
Type de Modèles[11] : - R : réglementaire - I : ingénieur - E : expertise	E	E	E	E	E	E	E	E	R	I/R
Robustesse (facilité de convergence)	NS	NS	M	S[12]/NS	NS	S	NS	NS	S	M (1D)/NS (2D)

Légende :

ok	pris en compte	S	satisfaisant
ok	domaine de représentativité limité	M	moyen
nook	non pris en compte	NS	Non satisfaisant
so	sans objet		

Tableau 5.2.2-1: Principales caractéristiques des différents modèles de fissuration

8 Le couplage se fait dans le loi nommée RGI_BETON qui couple le fluage (FLUA_PORO_BETON), l'endommagement (ENDO_PORO_BETON), et la RAG/RSI.

9 Modèle intrinsèquement couplé à un modèle de fluage et à un modèle de gonflement dû à la RAG

10 Le couplage est fait dans la loi FLUA_ENDO_PORO (COMPORTEMENT=_F(RELATION = 'FLUA_ENDO_PORO'). Il ne faut pas utiliser KIT_DDI. C'est une loi à part entière qui inclut les paramétrés matériaux et les variables internes de ENDO_PORO_BETON et FLUE_PORO_BETON.

11 R signifie qu'il s'agit d'un modèle réglementaire ou quasi-équivalent, I : signifie que c'est un modèle relativement robuste et qualifié pour nos applications, E: signifie que c'est un modèle dédié aux expertises, soit parce qu'il n'est pas très robuste (difficulté de convergence), soit parce qu'il est complexe à mettre en œuvre, soit parce qu'il n'est pas encore totalement validé.

12 En utilisant IMPL_EX pour la résolution (cf. [R5.03.81])

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Remarques :

1. *Pour des calculs types réglementaires, utiliser BETON_REGLE_PR ou MAZARS_GC (qui inclut des variables internes de post-traitement, V1 et V2 correspondant à un ratio contrainte/contrainte limite ou déformation/déformation limite, qui en 1D, correspond aux critères ELS/ELU classiquement utilisé en étude de génie civil, cf [R5.03.09]).*
   - MAZARS_GC pour le 1D (pour une utilisation avec des poutres multifibres) correspond à l'écriture 1D du modèle unilatéral de Mazars, qui permet de rendre compte de la refermeture des fissures.
   - MAZARS_GC pour le C_PLAN correspond à la version classique qui ne rend pas compte de la refermeture des fissures en cas de chargement alterné.
2. *Plus il y a d'ingrédients dans un modèle, plus le nombre de paramètres matériaux est important et généralement moins le modèle est robuste et performant : il est donc préférable de choisir le modèle le plus simple possible en identifiant bien le domaine où il va être sollicité.*
3. *Plus on cherche à décrire finement la fissuration et à décrire de long chemin de fissuration, plus la modèle doit être irréprochable d'un point de vue mathématique. De ce point de vue, c'est le modèle ENDO_FISS_EXP qui est le plus « performant ».*
4. *Le modèle ENDO_ISOT_BETON, version locale, peut-être résolu avec la méthode IMPL-EX, qui garantit d'avoir un résultat, ce qui peut être intéressant dans certains cas, mais attention la résolution dépend alors fortement de la discrétisation en temps, qui doit être très raffinée (cf. [R5.03.81]) et les résultats ne sont pas fiables en présence d'instabilités.*
5. *Excepté dans le cas où la fissuration est représentée par un modèle de zones cohésives, on n'a pas accès directement à une ouverture de fissure. A condition que l'endommagement soit suffisamment important, il est possible d'avoir un ordre de grandeur correct de cette ouverture en utilisant l'opérateur POST_ENDO_FISS dans un plan, dans le cas d'un modèle d'endommagement non-local (cf. [U4.86.01]), ou en calculant la différence de déplacement de part et d'autre de l'élément endommagé dans le cas d'un modèle local.*
6. *Le modèle BETON_DOUBLE_DP est le premier modèle qui a été développé pour décrire l'adoucissement du béton. Il a un inconvénient majeur, c'est qu'en raison de la forme du critère, il est possible dans les configurations de chargements bi- ou tri-dimensionnels, de dépasser la contrainte limite de traction.*

5.2.3 Description de l'endommagement/fissuration du béton armé

Le tableau suivant récapitule de la même manière les caractéristiques des lois permettant de décrire l'endommagement du béton armé via des lois dites globales, c'est-à-dire décrivant le comportement du béton et des aciers simultanément. L'un des principaux avantages de ces lois est de permettre de ne plus avoir de modèles adoucissants et donc de s'affranchir des problèmes associés (dépendance au maillage, difficulté de convergence,...).

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

	GLRC_DM [R7.01.32]	DHRC [R7.01.33]	GLRC_DAMAGE [R7.01.31]
Endommagement en extension	ok	ok	ok
Endommagement en compression	ok	ok	ok
Endommagement en cisaillement	ok	ok	ok
Membrane	ok	ok	ok
Flexion	ok	ok	ok
Refermeture de fissures	ok	ok	nook
Cisaillement transverse	nook	nook	ok
Déformations résiduelles (plastiques)	nook	ok	ok
Prise en compte des retraits	ok (uniquement ε^{th})	ok (uniquement ε^{th})	nook
Couplage	VMIS_CINE_LINE (membrane uniquement)	**so**	**so**
Type de chargement adapté : M : monotone C : cyclique I: impact	M/C	C	I
Niveau de dégradation atteignable : - M : Modéré - R : Ruine	M		R
Robustesse	S	S	S
Fiabilité/Validation	S	NS	S

Légende

x	pris en compte	S	satisfaisant
x	domaine de représentativité limité	M	moyen
nook	non pris en compte	NS	Non satisfaisant
so	sans objet		

Tableau 5.2.3-1 : Principales caractéristiques des modèles globaux de béton armé

Remarque :

Les lois globales ont été développées avec pour objectif d'être performantes pour les études dynamiques (chargements sismiques pour GLRC_DM et DHRC, chargement type impact pour GLRC_DAMA).

5.2.4 Compatibilité lois de comportement/modélisation

Toutes les lois de comportement ne sont pas disponibles pour toutes les modélisations. Le tableau suivant a pour but d'aider l'utilisateur à choisir, soit la modélisation qu'il peut adopter en fonction de la

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

loi de comportement choisie, soit de connaître les lois de comportement utilisables en fonction de la modélisation qu'il souhaite adopter.

	3D 3D_SI D_PLAN D_PLAN_SI	C_PLAN C_PLAN_SI	AXIS AXIS_SI	X_GRAD_VARI	DKT	POU_D_X	COQUE_3D	DKTG	X_INTERFACE
ELAS	ok	ok	ok	nook	ok	ok	ok	nook	nook
BETON_GRANGER **BETON_GRANGER_V**	ok	ok	ok	nook	nook	ok	nook	nook	nook
BETON_UMLV	ok	ok	ok	nook	nook	nook	nook	nook	nook
BETON_BURGER	ok	ok	ok	nook	nook	nook	nook	nook	nook
FLUA_PORO_BETON	ok	ok	ok	nook	nook	nook	nook	nook	nook
BETON_DOUBLE_DP	ok	ok	ok	nook	ok	ok	ok	nook	nook
MAZARS	ok	ok	ok	nook	ok	nook	ok	nook	nook
ENDO_FISS_EXP	nook	nook	nook	ok	nook	nook	nook	nook	nook
ENDO_ISOT_BETON	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	nook	nook
ENDO_ORTH_BETON	ok	ok	ok	nook	ok	nook	ok	nook	nook
ELAS+ **CZM_OUV_MIX** **ELAS+** **CZM_EXP_MIX**	nook	nook	nook	nook	nook	nook	nook	nook	ok
BETON_RAG	ok	ok	ok	nook	nook	nook	nook	nook	nook
ENDO_PORO_BETON	ok	ok	ok	nook	nook	nook	nook	nook	nook
BETON_REGLE_PR	ok PLAN uniquement	ok	nook	nook	ok	nook	ok	nook	nook
MAZARS_GC	nook	ok Mazars classique	nook	nook	ok Mazars classique	ok Mu modèle	nook	nook	nook
GLRC_DM	nook	nook	nook	nook	nook	nook	nook	ok	nook
GLRC_DAMA	nook	nook	nook	nook	nook	nook	nook	ok	nook

Tableau 5.2.4-1: Lois de comportement utilisables en fonction de la modélisation choisie

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

5.3 Lois de comportement utilisables pour l'acier

En pratique, quasiment toutes les lois implantées en $3D$ sont disponibles pour les modélisations volumiques et planes mais aussi pour les modélisations DKT et COQUE_3D (nativement, si la loi est programmée en contraintes planes, via l'algorithme DeBorst [R5.03.03] si ce n'est pas le cas) et pour les éléments dont le comportement est 1D (BARRE, POU_D_EM, POU_D_TGM, GRILLE_MEMBRANE, GRILLE_EXCENTREE) grâce à l'algorithme DeBorst1D [R3.03.09].
Dans le tableau ci-dessous, on mentionne les lois les plus couramment utilisées.

	Élasticité : ELAS	**Plasticité avec écrouissage isotrope :** GRILLE_ISOT_LINE	**Plasticité avec écrouissage isotrope :** VMIS_ISOT_LINE VMIS_ISOT_TRAC VMIS_ISOT_PUIS	**Plasticité avec écrouissage cinématique :** GRILLE_CINE_LINE	**Plasticité avec écrouissage cinématique :** VMIS_ISOT_CINE	**Plasticité+effet Bauschinger[13] :** GRILLE_PINTO_MEN	**Plasticité+effet Bauschinger[14] :** PINTO_MENEGOTTO	**Plasticité+Endommagement couplé à la corrosion :** CORR_ACIER	**Viscoélasticité** RELAX_ACIER
Éléments volumiques ou plans	X		X		X			X	
DKT	X		X		X			X	
COQUE_3D	X		X		X			X	
MEMBRANE	X								
GRILLE_MEMBRANE	X	X		X		X			
GRILLE_EXCENTREE	X	X		X		X			
POU_D_TGM POU_D_EM	X		X		X		X	X	
BARRE/2D_BARRE	X	V	X		X		X	X	X

Tableau 5.3-1: Modèles de comportement utilisables pour l'acier en fonction de la modélisation choisie

13 Traduit le fait que si l'on plastifie un métal dans une direction donnée, puis qu'on le déforme en sens inverse dans la même direction, on observe que la limite d'élasticité a diminué.

14 Traduit le fait que si l'on plastifie un métal dans une direction donnée, puis qu'on le déforme en sens inverse dans la même direction, on observe que la limite d'élasticité a diminué.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

5.4 Modèles de comportement utilisables pour la liaison acier-béton

Dans la plupart des cas, il est suffisant de considérer que la liaison entre l'acier et le béton est parfaite. Dans ce cas, il suffit que les mailles acier et les mailles béton s'appuient sur les mêmes nœuds. Si les maillages ne sont pas compatibles, alors il faut créer des liaisons cinématiques entre les nœuds des deux matériaux (ce qui alourdit bien sûr les calculs). Ces liaisons cinématiques sont générées automatiquement par l'opérateur DEFI_CABLE_BP.

Néanmoins, il peut arriver qu'on souhaite prendre en compte ce phénomène, par exemple pour simuler une situation où l'adhérence entre l'acier et le béton est très dégradée ou parce que l'on souhaite rechercher des informations locales telles que des espacements et des ouvertures de fissures. Des modèles sont donc disponibles dans *Code_Aster*, mais signalons que la caractérisation de la liaison acier-béton, et par conséquent l'identification des paramètres des lois de comportement, restent difficiles d'accès.

Pour une modélisation en AXIS ou D_PLAN, l'acier et le béton peuvent être maillés explicitement et reliés par un élément de joint (modélisation AXIS_JOINT ou PLAN_JOINT, [U3.13.14]), auquel la loi de comportement JOINT_BA [R7.01.21] est affectée. Toutefois, signalons qu'il s'agit d'un modèle très riche mais compliqué à mettre en œuvre, et qui peut présenter des résultats peu physiques pour des grands glissements (reprise importante de rigidité).

Pour une modélisation du béton en 3D, et une représentation des aciers, soit en 3D, soit sous forme de MEMBRANE, il est possible de décrire la liaison acier-béton à l'aide d'éléments d'interface placés entre les 2 matériaux (modélisation 3D_INTERFACE [U3.13.14]) auxquels la loi de comportement CZM_LAB_MIX est affectée [R7.02.11].

Enfin, signalons qu'il est possible de représenter des câbles frottants en $1D$, à l'aide de la modélisation CABLE_GAINE [R3.08.10] et de la loi de comportement CABLE_GAINE_FROT. Le modèle de frottement est de type Coulomb (cf. test ZZZZ347E).

5.5 Modélisation de l'interaction sol – structure et Interaction structure - sol - structure

La prise en compte de l'interaction sol-structure (ISS) et de l'interaction structure-sol-structure (I3S) équivaut à considérer l'énergie dissipée dans le sol et les effets de couplage entre le sol et des bâtiments proches lors de sollicitations dynamiques (séisme). En statique, elle permet d'avoir des conditions aux limites plus réalistes qu'un encastrement parfait.
Plusieurs méthodes existent pour modéliser l'interaction entre le(s) structure(s) étudiée(s) et le sol.

- Modéliser explicitement le sol avec des éléments isoparamétriques (à noter que, dans *Code_Aster*, seul le modèle élastoplastique de comportement dit de « Hujeux » [R7.01.23] est capable de prendre en compte un chargement cyclique. Il permet de considérer le comportement de géomatériaux granulaires, argiles sableuses normalement consolidées ou sur-consolidées, graves,....) . En statique, on peut se contenter de modéliser le sol en élastique ou avec une loi de Mohr-Coulomb [R7.01.28].
- Utiliser des ressorts de sol pour des calculs réglementaires d'ISS, pour prendre en compte le décollement et la réduction du nombre des modes d'une fondation (cf. **[U2.06.08] Décollement Dynamique de fondation en interaction sol-structure (ISS) par méthode de ressorts de sol**).
- Utiliser MISS3D (cf. **[U2.06.07] Analyse sismique en ISS et ISFS avec le chaînage Code_Aster – MISS3D par la commande CALC_MISS** pour les cas classiques (domaine élastique) et [U3.06.21] pour les cas plus complexes lors de la prise en compte de la variabilité spatiale dans les analyses sismiques **[U2.06.12] Interaction sol-structure en analyse sismique avec prise en compte de la variabilité spatiale**).

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

A noter que : MISS3D permet de modéliser à la fois des fondations rigides ou souples, des sols hétérogènes - avec une extension particulière aux sols stratifiés (pas de pris en compte du pendage) - et des radiers de forme quelconque, et ainsi permettre les calculs d'interaction dynamique avec une ou plusieurs structures quelconques (I3S).
Le chaînage *Code_Aster* – MISS3D est basé sur un couplage de type BEM-FEM qui permet de prendre en compte l'ISS et l'I3S dans les calculs dynamiques en analyse sismique. Néanmoins, la résolution étant en fréquence, seuls les problèmes linéaires pouvaient être traités jusqu'à présent avec cette approche.

- Utiliser MISS3D pour les cas complexes. Une nouvelle méthode Laplace-temps, qui passe aussi par le calcul des impédances de sol avec MISS3D, permet ensuite de réaliser des calculs transitoires non-linéaires (avec l'utilisation de DYNA_NON_LINE).

Le tableau ci-dessous permet de comparer facilement les caractéristiques et le domaine de validité des différentes modélisations.

	Colonne de sol (géomécanique)	**RIGI_PARASOL (calcul d'ISS en *Code_Aster* pur)**	**CALC_MISS (calcul d'ISS avec MISS3D)**
Décollement	so	ok (calcul des impédances avec MISS3D)	ok (calcul mécanique avec *Code_Aster*)
Fondation Superficielle	ok	ok	ok
Fondation enterrée	ok	**ok**	ok
Sol souple (S) /rigide(R)	S	R et S	R et S
Variabilité spatiale (DYNA_ISS_VARI)	nook	**ok** (préalable à un calcul de modes de fondation quelconque)	ok
Type de chargements : SL : statique linéaire SNL : Statique non-linéaires DL : dynamique linéaire DNL ; dynamique non-linéaire	ok SL,SNL, DL, DNL	ok SL,SNL, DL, DNL	ok SL,DL **ok** SNL, DNL avec utilisation de la méthode Laplace/temps
Type de Modèles[15] : - R : réglementaire - I : ingénieur - E : expertise	I et E	R, I et E	R, I et E

Tableau 5.5-1: Comparaison des différentes modélisations de l'interaction sol-structure

Légende
ok pris en compte
ok domaine de représentativité limité
nook non pris en compte
so **sans objet**

Pour un aperçu global des différentes méthodes existantes pour le traitement de l'interaction sol-structure sous code_aster, voir **[U2.06.05] Méthodes pour l'ISS**.

15 R signifie qu'il s'agit d'un modèle réglementaire ou quasi-équivalent, I : signifie que c'est un modèle relativement robuste et qualifié pour nos applications, E: signifie que c'est un modèle dédié aux expertises, soit parce qu'il n'est pas très robuste (difficulté de convergence), soit parce qu'il est complexe à mettre en œuvre, soit parce qu'il n'est pas encore totalement validé.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

6 Divers

6.1 Calcul de ferraillage

Il est possible de calculer le ferraillage d'une structure à l'aide de l'opérateur CALC_FERRAILLAGE [U4.81.42]. La méthode utilisée est celle de Capra et Maury [R7.04.05]

6.2 Macro d'aide à l'identification des paramètres matériaux

Pour un certain nombre de lois de comportement, l'identification des paramètres matériaux peut s'avérer relativement complexe. Aussi, certaines macros ont été développées pour aider les utilisateurs à réaliser cette étape, voire des outils-métiers sous salome_meca. Il s'agit de :

- DEFI_GLRC [U4.42.06] pour les lois globales GLRC_DM et GLRC_DAMAGE, qui permet d'obtenir les propriétés du béton homogénéisé à partir des caractéristiques physiques et géométriques du béton armé ;
- DEFI_MATER_GC [U4.42.07] pour (i) les lois de MAZARS ou MAZARS_GC en se servant des règles issues du BAEL91, de l'Eurocode 2 ou en fournissant des caractéristiques matériaux classiques (ii) pour la loi ENDO_FISS_EXP ;
- l'outil-métier ARCADE [SU1.11.01] sous salome_meca qui permet d'identifier les paramètres de la loi de fluage BETON_BURGER_FP et même de les recaler dans le cas des enceintes de confinement ;
- l'outil-métier d'identification des paramètres de la loi de béton armé DHRC [SU1.10.01]. Signalons que l'utilisation de cet outil peut également permettre de donner la réponse linéaire réaliste pour des sections de plaques béton armé quelconques en flexion et en membrane, de vérifier les propriétés homogénéisés ou de quantifier les effets de couplage flexion-membrane par exemple.

A noter également, dans un registre proche, l'existence la commande CALC_ESSAI_GEOMECA [U4.90.21] qui permet de vérifier la pertinence des paramètres de lois de sols identifiés en obtenant la réponse sur point matériel pour différents essais tels que des essais triaxiaux monotones ou cycliques, drainés ou non, des essais oedométriques, etc.

La documentation de référence reste en tout état de cause, une source d'informations indispensable sachant qu'en complément, pour certaines lois, il existe en interne EDF, des Fiches d'Identités Modèles qui explicitent les techniques d'identification.

6.3 Pré / Post-traitement

6.3.1 Vérification mise en donnée

On a souvent besoin de vérifier la mise en donnée, pour être sûr par exemple d'avoir affecté les bonnes caractéristiques géométriques à des éléments de structures, de les avoir bien orientés, que les champs de matériaux affectés ont bien été affectés aux bons groupes de mailles,...
Des outils de visualisation peuvent être intéressants pour aider à la vérification de la mise en données ;

- Visualiser l'orientation des éléments de structures sous SaloméMeca. Ceci est possible en imprimant au format MED (cf. [U7.05.21]) le repère local et en visualisant ces concepts sous salome_meca. Un exemple est montré ci-dessous.

- Visualiser avec des couleurs différentes, les groupes de maille ayant une épaisseur différente, ayant été affectés par des matériaux différents,etc. Pour cela, il convient d'imprimer le champ souhaité au format MED (cf. [U7.05.21]), par exemple :

```
IMPR_RESU(    FORMAT='MED',
 CONCEPT=(_F(CHAM_MATER = CHMAT),
```


Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

```
_F( CARA_ELEM = CARELE),
_F( CHARGE = CHAR1),),);
```

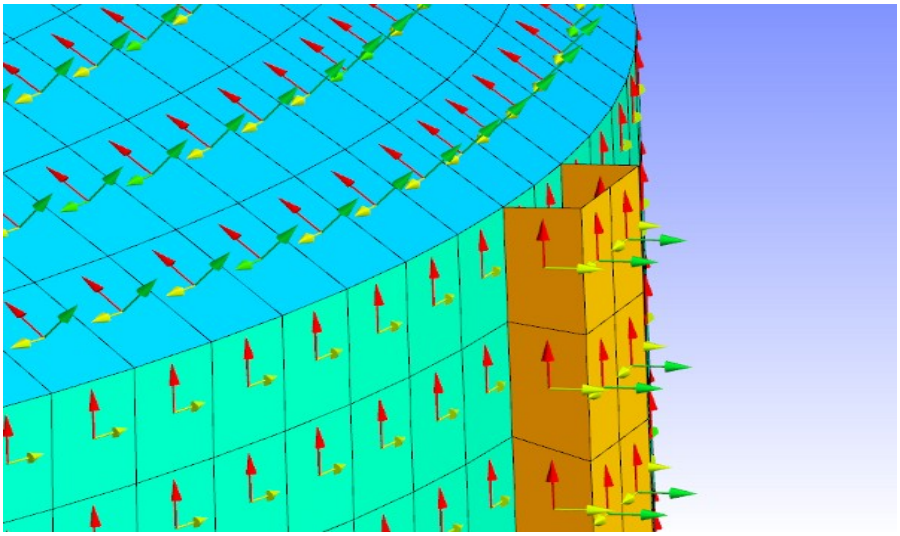


Figure 6.3.1-1: exemple de visualisation de l'orientation du repère local

On obtient alors dans un fichier med, un champ appelé CHMAT_CHAMP_MAT ayant une valeur par maille parmi : 0, 1, 2, …La correspondance entre les valeurs : 1, 2, 3 … et les noms des matériaux est écrite dans les fichiers de message et de résultat.

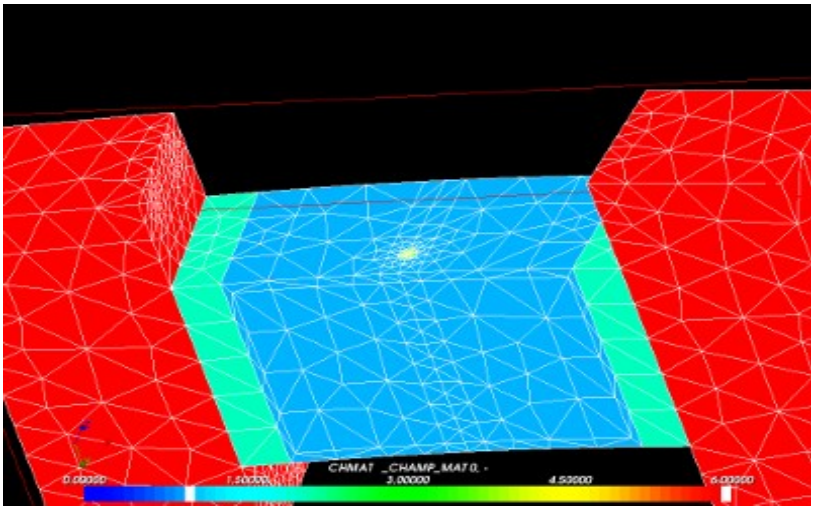


Figure 6.3.1-2: exemple de visualisation sous Salomé des affectations de matériaux

6.3.2 Post-traitements

Pour les post-traitements, de nombreuses possibilités sont offertes à l'utilisateur, qui ne peuvent être détaillées. Citons simplement quelques options spécifiques au Génie Civil :

- Grâce à l'opérateur CALC_CHAMP [U4.81.04], de nombreuses options sont disponibles en fonction de la modélisation ou de la loi de comportement utilisée, parmi lesquelles on peut citer :
  - isoler les déformations liées au fluage propre EPFP_XXXX ou de dessiccation EPFD_XXXX ;
  - isoler les déformations thermiques, le retrait endogène ou de dessiccation EPVC_XXXX ;
  - calculer des contraintes projetées sur la peau d'un volume (par exemple sur les parements d'un ouvrage hydraulique) SIRO_ELEM ;

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- calculer les énergies dissipées DISS_XXXX, ECIN_ELEM,..

- Visualiser les champs de contrainte ou de déformations dans les poutres multi-fibres (POU_D_EM) et les coques multi-couches (DKT) en utilisant la commande IMPR_RESU_SP, cf. **[SV1.01.01]**.

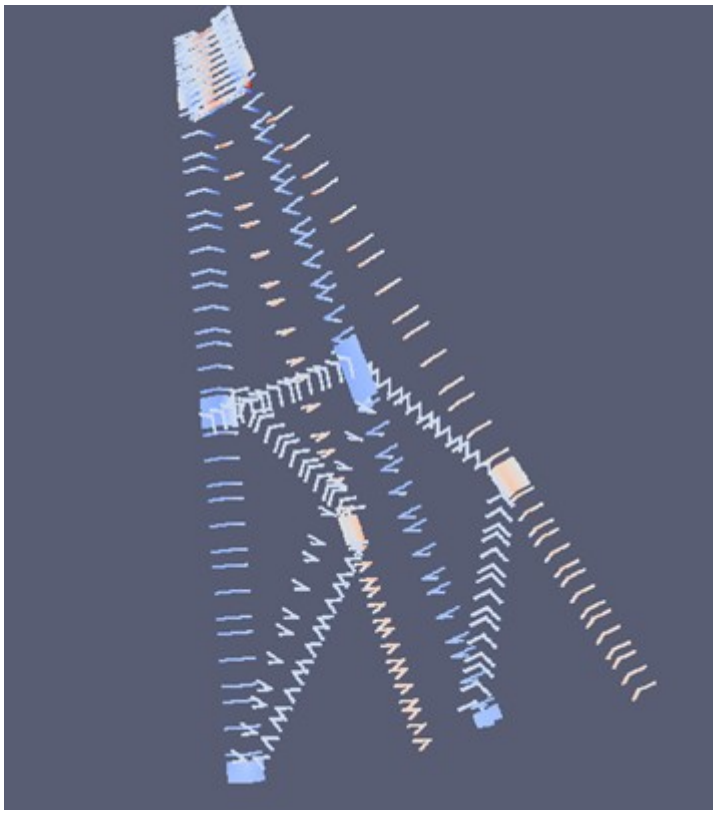


Figure 6.3.2-1: Exemple de visualisation aux sous-points

- Visualiser les efforts et moments internes pour les éléments de structures, cf. [U7.05.21] §6

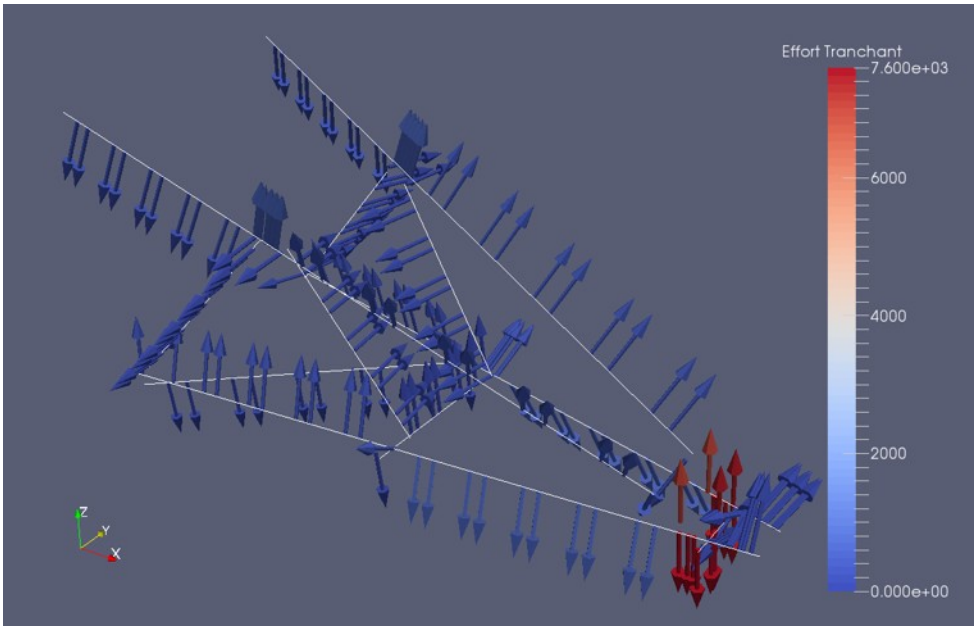


Figure 6.3.2-2 Exemple de visualisation des efforts tranchants sur des poutres

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- Extraire des efforts ou des déformations en un point quelconque d'une coque grâce à l'opérateur POST_COQUE [U4.81.23].
- Tracer le chemin de fissuration et calculer l'ouverture de fissure ($2D$ uniquement) à partir d'un calcul d'endommagement non-local (GRAD_VARI) grâce à l'opérateur POST_ENDO_FISS [U4.86.01].
- Construction de courbe de fragilité avec POST_DYNA_ALEA, [U4.84.04] et [U2.08.05].

7 Ce que Code_Aster ne sait pas (encore) faire

Aucun modèle n'est disponible de manière directe dans *Code_Aster* pour représenter :

- l'endommagement du béton à haute température (pas d'endommagement d'origine thermique),
- le Transient Thermal Creep (déformation irréversible qui se produit lorsqu'on chauffe le béton à plus de 100°C alors qu'il est soumis à chargement de compression),
- la carbonatation du béton,
- la fissuration du béton au jeune âge,
- prise en compte du rayonnement thermique dans les calculs (on peut en revanche utiliser le code SYRTHES),
- le couplage hydratation-séchage,
- un modèle de fluage adapté spécifiquement au jeune âge ou aux températures supérieures à 80°C.
- prise en compte du séchage et de l'hydratation pour les éléments de structure.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)