



GROUPE : ACOUSTIQUE, VIBRATIONS SOUS ÉCOULEMENTS ET DYNAMIQUE DES MACHINES - T63

Compte-rendu AMA CR-AMA-11.028	Projet ODYMAT : Recette du transfert des fonctionnalités de calculs modal, harmonique et transitoire linéaire des rotors dans <i>Code_Aster</i>	M. Torkhani X. Raud 11/02/11
---	--	---

DIFFUSION PRINCIPALE :

N. SELLALI, P. VOINIS, X. RAUD, E. BOYERE, M. HELENE, N. GREFFET, P. VAUGRANTE, I. NISTOR, P. SANS, L. MAY, C. DURAND, N. TARDIEU, M. COURTOIS (AMA)

DIFFUSION COMPLÉMENTAIRE : CDD AMA, CDD-DÉLEGUE AMA, CdG AMA, P. MASSIN (LAMSID), P. VERRIER (SEPTEN), D. LE RÉVÉREND (CASP 5)

SYNTHESE

Le périmètre de ce document concerne la recette du transfert, dans *Code_Aster*, des fonctionnalités spécifiques pour les analyses linéaires des machines tournantes. En l'absence d'une spécification claire (iso-fonctionnalité avec CADYRO), on a commencé le travail par une étape de vérification (réponse à la question : est-ce bien programmé ?). La conformité iso-fonctionnelle en termes de résultats n'a pas été atteinte à l'issue de cette étape (écarts constatés lors de la reprise de certains cas-tests de CADYRO). Il a fallu alors passer à une phase plus approfondie de validation (réponse à la question : ce qui est programmé est-il juste ?). Cette étape s'appuie sur des résultats publiés et reconnus (calculs analytiques, littérature spécialisée, manuel de qualification de ROTORINSA, etc.). La démarche suivie nous permet in fine de prononcer la recette du transfert de CADYRO dans *Code_Aster*, et ce bien que la base des cas-tests CADYRO ne soit pas intégralement transférée.

Cette tâche est réalisée sous la forme d'un document de synthèse des fonctionnalités linéaires de *Code_Aster* pour les machines tournantes ainsi que de l'ensemble des cas tests de vérification et de validation.

Il s'agit d'un mix du livrable 111 et d'une partie des livrables 112 et 114 du projet ODYMAT.

1	DESCRIPTION DU LIVRABLE.....	2
1.1	OBJECTIFS	2
1.2	CONTENU	2
1.3	TYPE.....	2
2	PERIMETRE DE LA VALIDATION.....	2
2.1	BILAN DES FONCTIONNALITÉS DE <i>CODE_ASTER</i> EN COMPARAISON AVEC CADYRO	2
2.2	DÉMARCHE DE VALIDATION	2
3	PRE-TRAITEMENT.....	3
3.1	FONCTIONNALITÉS DE MISE EN DONNEE DU ROTOR ET DES MASSES LOCALISEES	3
3.2	INTRODUCTION DE LA GYROSCOPIE DANS <i>CODE_ASTER</i>	3
3.3	FONCTIONNALITÉS DE MISE EN DONNEE DU SUPPORTAGE	3
3.4	INTRODUCTION DES ÉLÉMENTS DISCRETS NON SYMÉTRIQUES.....	3
3.5	AXE DE ROTATION ET CONVENTION DE SIGNE.....	4
3.6	COUVERTURE DE FONCTIONNALITÉS DE PRE-TRAITEMENT	4
4	CALCUL.....	5
4.1	RÉPERCUSSIONS DE LA GYROSCOPIE ET AMÉLIORATIONS DANS <i>CODE_ASTER</i>	5
4.2	VALIDATION DES CALCULS MODAUX	5
4.3	VALIDATION DES CALCULS STATIQUES	5
4.4	VALIDATION DES CALCULS HARMONIQUES.....	5
4.5	VALIDATION DES CALCULS TRANSITOIRES LINÉAIRES	6
4.6	COUVERTURE DE FONCTIONNALITÉS DE CALCUL.....	7
5	POST-TRAITEMENT	8
5.1	DIAGRAMME DE CAMPBELL	8
5.2	AUTRES OPÉRATIONS DE POST-TRAITEMENT DE TYPE MACHINES TOURNANTES	8
6	CONCLUSION	9

7	ANNEXES	10
7.1	FICHES ÉMISES ET RESOLUES	10
7.2	DOCUMENTS RÉDIGÉS	11
7.3	LISTE DES CAS TESTS <i>CODE_ASTER</i>	11
7.4	LISTE DES CAS TESTS CADYRO EN VIS-À-VIS DES CAS TESTS <i>CODE_ASTER</i> ÉQUIVALENTS	12

1 DESCRIPTION DU LIVRABLE

1.1 OBJECTIFS

L'objectif dans le cadre du projet ODYMAT est de vérifier que *Code_ASTER* puisse proposer des capacités de modélisation équivalentes à celle de CADYRO et, le cas échéant, programmer les fonctionnalités manquantes (gyroscopie, éléments discrets non symétriques, etc.). L'objectif du CR est donc double :

- valider les nouveaux développements réalisés
- vérifier la non régression entre les fonctionnalités proposées in fine par *Code_Aster* et celles de CADYRO.

Pour cela, on ne construit pas, dans *Code_Aster*, le strict équivalent de la base de validation CADYRO, qui s'apparente plutôt à une base d'études types pour les lignes d'arbres. En effet, cela ne s'accorde pas avec la doctrine des cas tests de *Code_Aster*, qui ne sont pas des exemples d'étude mais des validations élémentaires de ses différentes fonctionnalités.

Le transfert, proprement dit, de l'ensemble de la base des tests de validation de CADYRO vers *Code_Aster* est une tâche indépendante de ce travail de validation élémentaire, et l'utilité d'une reconduction à l'identique de cette base d'études n'apparaît pas évidente et reste toutefois à instruire.

1.2 CONTENU

Pour répondre à l'objectif, il s'agit de pouvoir rejouer et valider, avec *Code_Aster*, les familles de cas-tests linéaires de la base du code CADYRO (cf. annexe 4 pour plus de détails sur la complétude de la couverture des fonctionnalités pour ces cas-tests) :

- DLGA, DLRA, DLRR, DLSA : calcul de modes propres
- HLGA, HLRA, HLRR, HLSA : calcul de réponse harmonique
- SLRA : calcul statique sous poids propre
- TLRA, TLRR, TLSA, TLSR : calcul transitoire

1.3 TYPE

Il s'agit d'un CR de recette avec création d'une base de cas d'études correspondant aux familles de cas-tests dans la base de données de *Code_Aster*. Chaque étude est constituée de :

- un fichier maillage (*.mail),
- un fichier commande (*.comm),
- et les documentations *Code_Aster* associées : Doc U, V et R.

2 PERIMETRE DE LA VALIDATION

2.1 BILAN DES FONCTIONNALITÉS DE *CODE_ASTER* EN COMPARAISON AVEC CADYRO

On a, dans un premier temps, fait un bilan des fonctionnalités de *Code_Aster* permettant de rejouer l'ensemble des cas-tests de la base de validation CADYRO.

- Dans *Code_Aster*, on retrouve les éléments poutres (poutre d'Euler, poutre de Timoshenko) utilisés dans CADYRO, ainsi que les éléments discrets de masse, d'amortissement et de raideur, non symétriques dans le cas général, avec les 3 degrés de liberté de translation et les 3 degrés de liberté de rotation.
- Sur ces éléments les calculs de masse, de raideur et d'amortissement visqueux sont disponibles dans *Code_Aster*.
- Les calculs de statique de CADYRO sont donc jouables dans *Code_Aster*.
- En dynamique, les calculs modaux et dynamiques (harmoniques et transitoires), sont réalisables aussi bien sur base modale (iso-fonctionnalité CADYRO/*Code_Aster*) que dans l'espace physique (exhaustivité *Code_Aster*).

2.2 DÉMARCHE DE VALIDATION

Pour la validation des nouvelles fonctionnalités introduites dans *Code_Aster*, trois options ont été utilisées :

- plutôt que de rejouer les tests CADYRO sans les questionner, on a préféré s'appuyer sur des références reconnues de la littérature publiée sur le sujet, aisément accessibles à l'extérieur (Prediction in Engineering, Michel Lalanne et Guy Ferraris et Vibrations des structures, René-Jean Gibert).

- on s'appuie sur l'expertise de l'INSA-Lyon pour les "mœurs et coutumes" en modélisation et simulation des machines tournantes, en particulier certains cas-tests de validation sont issus du manuel de qualification de ROTORINSA.
- pour certaines fonctionnalités, le cas-test CADYRO est obligatoire pour la validation, car l'équivalent n'existe ni dans ROTORINSA, ni dans la littérature spécialisée.

3 PRE-TRAITEMENT

3.1 FONCTIONNALITÉS DE MISE EN DONNÉE DU ROTOR ET DES MASSES LOCALISÉES

De façon générale, les rotors sont modélisés par des éléments de type poutre et leur affectation dans *Code_Aster* se fait dans l'opérateur AFPE_MODELE. Il faut noter qu'un élément rotor dans *Code_Aster* peut être cylindrique (poutre de section circulaire, définie par son rayon) ou quelconque (poutre de section générale, définie par son aire, ses inerties par rapport aux axes, et ses coefficients de cisaillement). Il peut aussi être plein ou creux.

A noter également que dans CADYRO, il existe deux géométries : l'une pour calculer les masses, l'autre pour calculer les raideurs. Dans les développements actuels de *Code_Aster*, cela se traduit par la création de deux mailles identiques de type SEG2 poutre, l'une avec un module d'Young nul (pour la géométrie des sections masses), et l'autre avec une masse volumique nulle (pour la géométrie des sections raideurs). Cela se fait sans difficultés particulières, hormis un message d'avertissement signalant la présence de mailles doubles. Cette dualité section en raideur / section en masse pourra être levée sans difficultés.

Pour les masses ponctuelles (de type disque, ailette ou quelconque), tout peut se ramener aux paramètres masse et inerties. Ces masses sont donc modélisées par des éléments discrets dans l'opérateur AFPE_MODELE.

3.2 INTRODUCTION DE LA GYROSCOPIE DANS *CODE_ASTER*

La matrice de gyroscopie a été développée pour les éléments poutres et les éléments discrets de *Code_Aster*. Son expression théorique est décrite dans le document de Référence *Code_Aster* [R5.05.07].

Comme cette matrice a la particularité d'être non-symétrique (anti-symétrique), des développements importants ont été réalisés pour l'adaptation des outils d'algèbre linéaire de *Code_Aster*, qui, pour la plupart, n'étaient conçus que pour les matrices symétriques et n'étaient que partiellement validés dans le cas non symétrique.

En ce qui concerne l'iso-fonctionnalité avec CADYRO, la prise en compte de la gyroscopie dans *Code_Aster* est disponible pour les poutres droites à section constante de Timoshenko/Bernoulli. Elle est également disponible pour les poutres à section variable (rotor tronconique). Dans ce cas, elle est introduite en faisant l'approximation que l'inertie moyenne de la poutre est la moyenne de ses inerties aux deux extrémités. La méthode de validation utilisée pour mesurer l'effet de cette hypothèse est purement numérique. En effet, les résultats de référence sont obtenus par une discrétisation en éléments de poutre à section circulaire constante. Les valeurs de référence ont été encadrées par les résultats de deux modélisations :

- la première, approchant la solution exacte par valeurs inférieures, consiste à affecter à chaque élément la section circulaire constante de diamètre égal au diamètre du rotor étudié au droit du nœud initial de l'élément.
- la deuxième, approchant la solution exacte par valeurs supérieures, consiste à affecter à chaque élément la section circulaire constante de diamètre égal au diamètre du rotor étudié au droit du nœud final de l'élément.

Cette hypothèse s'avère légitime dans une première approximation, et il conviendra de l'affiner si besoin.

De façon annexe, on souligne l'extension, plus formelle qu'opérationnelle, du calcul de la matrice gyroscopique à tous les types de poutre de *Code_Aster*. Elle correspond au souci d'exhaustivité habituel dans l'assurance qualité de *Code_Aster*. Cependant, les types de poutre considérés ne sont *a priori* pas utilisés dans les applications visées par CADYRO.

3.3 FONCTIONNALITÉS DE MISE EN DONNÉE DU SUPPORTAGE

Dans le formalisme *Code_Aster* (AFPE_MODELE), les supports simplifiés, les paliers linéaires et les paliers de torsions (généralement non symétriques) sont des éléments discrets, caractérisés par les valeurs en raideur, amortissement et masse.

La prise en compte du massif peut se faire de 3 façons différentes :

- support modélisé par un appui infiniment rigide (SDLL126A),
- support simplifié, modélisé par un élément discret (SDLL123C),
- support généralisé, pris en compte par un calcul direct ou par sous-structuration de Craig-Bampton (SDLV132A).

3.4 INTRODUCTION DES ÉLÉMENTS DISCRETS NON SYMÉTRIQUES

Pour prendre en compte les coefficients dynamiques non symétriques des paliers et des supports dans le calcul des rotors, il est indispensable de pouvoir affecter aux éléments discrets correspondant des caractéristiques non symétriques. Ce travail a fait l'objet d'une évolution et restitution dans *Code_Aster* (cf. fiche REX 12024).

3.5 AXE DE ROTATION ET CONVENTION DE SIGNE

La convention de sens de rotation des machines tournantes prise dans *Code_Aster* implique de choisir un axe de rotation et de définir le sens positif suivant l'axe du rotor comme étant le sens usuel trigonométrique (anti-horaire).

Si on crée un modèle de GTA avec des nœuds d'abscisses croissantes en parcourant les lignes d'arbres du corps HP vers l'alternateur, le sens de rotation de la machine est positif suivant l'axe utilisé. Si au contraire on modélise en partant de l'alternateur vers le corps HP, le sens de rotation se trouve être inversé. Par souci d'exhaustivité et de généralité d'utilisation dans *Code_Aster*, il est donc nécessaire de pouvoir définir des vitesses de rotation aussi bien positives que négatives suivant n'importe quel axe de rotation.

Le sens de rotation positif est une convention de signe. En d'autres termes, le respect de cette convention par un utilisateur standard permet de garantir la cohérence et la conformité des résultats obtenus avec la mise en donnée réalisée. L'utilisateur avancé, quant à lui, pourra choisir sa propre convention de signe (ie. faire tourner négativement sa ligne d'arbres selon son axe de rotation) tout en veillant à la cohérence entre sa modélisation, sa mise en donnée, son calcul et l'interprétation des résultats obtenus.

Par ailleurs, il est permis dans *Code_Aster* une mise en donnée de modèles de lignes d'arbres orientées selon un axe de rotation quelconque défini par ses angles nautiques. Comme la mise en donnée des poutres du rotor est réalisée à partir de l'orientation imposée par le maillage construit (donc dans le repère global), il faut impérativement veiller à ce que les éléments discrets modélisant les disques, paliers et supports soient affectés dans le repère local en précisant `REPERE='LOCAL'`, en définissant ce repère local (mot-clé `ORIENTATION`), l'option `MECA_GYRO` permettant le changement effectif de repère.

Pour la commodité d'utilisation de l'IHM, il va être nécessaire d'imposer l'axe de rotation, de définir le sens positif suivant cet axe comme étant le sens usuel de rotation (sens trigonométrique) et de respecter ce choix du début jusqu'à la fin de l'étude. Cette imposition de l'axe de rotation ne conduit pas à s'écarter de la logique éléments finis du *Code_Aster*, mais permet de définir une logique d'utilisation, d'homogénéiser les modèles, de minimiser les erreurs de signes lors des différents échanges de données (entre *Code_Aster* et Edyos en l'occurrence).

3.6 COUVERTURE DE FONCTIONNALITÉS DE PRE-TRAITEMENT

Mise en donnée		Commande Code-Aster		
Rotor	d1, d2	Diamètres de l'arbre	AFFE_CARA_ELEM	section 'cercle' ou quelconque
	E, v et ρ	Matériau de l'arbre	DEFI_MATERIAU	E, v et ρ et +
Masse localisée	D1, D2, épaisseur Md, Id et Ip	Diamètres, épaisseur	AFFE_CARA_ELEM	élément discret
		Masse, inerties diamétrales et polaires	AFFE_CARA_ELEM	
Supportage	Kxx,Kyy,Kzz,Kxz,Kzx Cxx,Cyy,Czz,Cxz,Czx Nœud 1 sur le rotor, Nœud 2 sur un support fixe ou élastique	Raideurs (fonction de Ω : table)	AFFE_CARA_ELEM	élément discret
		Amortissement (fonction de Ω : table)		élément discret
		Liaisons entres les DDL en translation entre deux nœuds		
Élément d'accouplement	DDL (u, v, w, θ_x , θ_z , θ_y) Deux nœuds	Matrice 16x16 Raideur radiale et de flexion	AFFE_CARA_ELEM	élément discret

4 CALCUL

4.1 RÉPERCUSSIONS DE LA GYROSCOPIE ET AMÉLIORATIONS DANS *CODE_ASTER*

Un nouvel algorithme de calcul de modes, proche de celui utilisé par CADIRO pour le calcul des modes avec prise en compte de la gyroscopie, a été introduit. Il s'agit de la méthode dite « QZ ». Il est à souligner que ce type d'algorithme n'est utilisable pratiquement qu'avec de petits problèmes (quelques centaines de degrés de liberté au maximum). C'est pourquoi, la méthode de Sorensen, permettant de capturer convenablement tout le spectre, a été améliorée pour résoudre des problèmes quadratiques de grande taille.

Concernant le calcul sur base modale des modes propres (et aussi des réponses harmonique et transitoire) des lignes d'arbres, il a été question de la validation de l'opérateur de projection de *Code_Aster* pour le cas des matrices non symétriques.

Ces deux réalisations ont permis de mettre en œuvre le calcul des modes avec gyroscopie en deux étapes, selon la démarche mise en place dans CADIRO suivante :

1. on calcule d'abord les modes normaux (sans amortissement, ni gyroscopie).
2. on projette ensuite le problème modal quadratique sur la base des modes normaux réduite. Ainsi pour le calcul modal quadratique on peut employer une méthode robuste comme QZ même sur une géométrie détaillée. Il suffit de choisir une base réduite représentative du problème.

4.2 VALIDATION DES CALCULS MODAUX

Pour valider le calcul de modes propres des rotors, on a recréé dans *Code_Aster* des cas-tests reconnus dans la littérature (R.-J. Gibert et Lalanne & Ferraris).

Ils correspondent aux test suivants dans la nomenclature *Code_Aster* :

- SDLL123a/b/c/d/e/f : ligne d'arbres simplifiée avec gyroscopie
- SDLL140a : ligne d'arbre avec trois disques
- SDLL141a : ligne d'arbre sans disque
- SDLL141b : ligne d'arbre sans disque (inclinaison de 45°)
- SDLL141c : ligne d'arbre sans disque (modélisé par des éléments discrets)
- SDLL124a : diagramme de Campbell d'une poutre avec 3 disques soumise à l'effet gyroscopique
- SDLL127a/b/c : ligne d'arbres avec rotor à section circulaire variable
- SDLL125a/b : diagramme de Campbell d'une poutre avec 2 disques et 2 paliers non symétriques
- SDLL128a : ligne d'arbres avec des caractéristiques de paliers dépendant de la vitesse de rotation
- SDLL129a : diagramme de Campbell d'une ligne d'arbres avec des paliers à caractéristiques fonction de la vitesse de rotation

Ces cas tests n'utilisent qu'un nombre restreint de degrés de libertés pour se conformer au principe dans *Code_Aster* de faire les tests les plus simples possibles (une petite centaine de degrés de liberté) et aussi pour coller aux résultats des publications. Mais dans le cadre de la mise au point de ces tests, on a pu effectuer sans difficulté des calculs avec des modèles de plus grande taille (800 ddl).

Il faut aussi noter qu'en cas de vitesses de rotation multiples, il est nécessaire de procéder pour chaque vitesse à une nouvelle mise en donnée dans l'opérateur AFPE_CARA_ELEM, puisque certains paramètres (les coefficients de paliers par exemple) dépendent de la vitesse de rotation.

4.3 VALIDATION DES CALCULS STATIQUES

Ce calcul a pour objectif d'évaluer la déformée statique de la ligne d'arbre sous l'effet de son poids propre, et d'évaluer les efforts statiques repris par les paliers, généralement non symétriques. Ce type de calcul peut être réalisé par l'opérateur MECA_STATIQUE comme l'illustre le cas-test ZZZZ274 pour le cas des discrets non symétriques.

Il est à noter que les aspects liés à la modélisation de l'altimétrie paliers (déplacement imposé au niveau du palier) et du délignage rotor (défaut de fibre neutre en translation ou en rotation de part et d'autre des plateaux d'accouplement) n'ont pas été regardés. En ce qui concerne le défaut de fibre neutre, comme il s'agit d'un effort tournant dépendant du carré de la vitesse de rotation (au même titre que l'effort de balourd), sa faisabilité dans *Code_Aster* est acquise et n'est pas à démontrer.

4.4 VALIDATION DES CALCULS HARMONIQUES

Pour valider le calcul harmonique des rotors, on a recréé dans *Code_Aster* des cas-tests reconnus dans la littérature (R.-J. Gibert et Lalanne & Ferraris).

Ils correspondent aux test suivants dans la nomenclature *Code_Aster* :

- SHLL102a : ligne d'arbre avec trois disques à l'effet d'un balourd
- SDLL126c/d : poutre en rotation avec 3 disques soumise à l'effet gyroscopique

- SHLL103a : rotor avec deux disques et deux paliers non symétriques (fréquence d'excitation différente de la vitesse de rotation)

L'effort appliqué sur la ligne d'arbres dans *Code_Aster* peut être du type :

- harmonique : effort de direction fixée, constant, ou proportionnel à f ou f^2 ,
- balourd : effort tournant, proportionnel à f^2 , défini par son amplitude en kg.m, et sa phase,
- externe : effort de direction fixe, donnée sous la forme d'une fonction dépendant de la fréquence.

où f est la fréquence.

Par exemple, pour calculer une réponse harmonique à balourd, il est nécessaire de créer un effort de module proportionnel à f^2 , et d'en effectuer une décomposition en une composante en cosinus et une composante en sinus suivant les deux directions radiales. Dans un calcul harmonique, le chargement est la partie réelle de l'excitation. Suivant l'axe de rotation, les chargements dans le plan sont donc affectés d'une phase bien précise en plus du déphasage φ du balourd (définissant l'angle entre la direction de rotation et celle du balourd à l'instant initial).

Rotation	Suivant X		Suivant Y		Suivant Z	
Phase mesurée par rapport	Y		Z		X	
Effort et phase	Y	φ	Z	φ	X	φ
Effort et phase	Z	$-90^\circ+\varphi$	X	$-90^\circ+\varphi$	Y	$-90^\circ+\varphi$

La variabilité des coefficients de paliers en fonction de la vitesse de rotation peut être prise en compte sans difficulté.

Nous signalons aussi la possibilité de projection sur base modale qui permet de calculer la réponse harmonique en présence d'amortissement et de gyroscopie de façon robuste et ce même sur des maillages de plus grande dimension.

4.5 VALIDATION DES CALCULS TRANSITOIRES LINÉAIRES

Pour valider le calcul transitoire sur bases modale et physique des rotors, on a recréé dans *Code_Aster* le cas-tests suivant dans la nomenclature *Code_Aster* :

- SDLL126a/b : poutre en rotation avec 3 disques soumise à l'effet gyroscopique

Pour des besoins en performance ou de validation croisée, le calcul transitoire linéaire avec gyroscopie peut se faire, soit de façon directe sur base physique (DYNA_LINE_TRAN), soit sur base modale (après projection des matrices assemblées, rendue possible grâce à l'extension de l'opérateur de projection aux matrices non symétriques).

Les efforts utilisables dans *Code_Aster* sont les mêmes que pour les calculs harmoniques, avec 2 efforts supplémentaires possibles : un effort constant, et le poids propre.

Par exemple, pour créer un effort de type balourd en calcul de réponse transitoire, il est nécessaire de créer un effort de module proportionnel à f^2 , et d'en effectuer une décomposition en une composante en cosinus et une composante en sinus suivant les deux directions radiales. Suivant l'axe de rotation de la ligne d'arbres, les chargements dans le plan sont affectés d'une phase bien précise en plus du déphasage φ du balourd.

Rotation	Suivant X		Suivant Y		Suivant Z	
Phase mesurée par rapport	Y		Z		X	
Effort	Y	$\cos(\omega t+\varphi)$	Z	$\cos(\omega t+\varphi)$	X	$\cos(\omega t+\varphi)$
Effort	Z	$\sin(\omega t+\varphi)$	X	$\sin(\omega t+\varphi)$	Y	$\sin(\omega t+\varphi)$

Par ailleurs et à l'instar de l'option MECA_GYRO pour l'amortissement gyroscopique, une nouvelle option RIGI_GYRO a été créée pour la raideur gyroscopique. La contribution de la matrice de raideur gyroscopique doit être multipliée par l'accélération angulaire, exprimée en rad/s^2 , et est combinée, après assemblage, à la matrice de rigidité classique.

La modélisation du ralentissement transitoire d'une machine tournante nécessite la prise en compte de la dépendance des matrices de rigidité et d'amortissement gyroscopiques et des forces tournants de balourd à la décélération angulaire. Les cas où il faut laisser la rotation libre d'évoluer en réponse à un couplé imposé ou l'imposer comme condition initiale par exemple (inconnue du problème) ne rentrent pas dans le cadre de l'iso-fonctionnalité CADYRO/*Code_Aster*. Pour les besoins applicatifs du projet ODYMAT, on veillera toujours à imposer l'évolution de la vitesse de rotation du rotor (consigne connue).

La variabilité imposée de la vitesse de rotation en fonction du temps, avec pour conséquence une modification des caractéristiques en rigidité et amortissement gyroscopiques et généralement des coefficients de paliers, ne peut qu'être partiellement prise en compte dans *Code_Aster* :

1. pour les transitoires lents (évolution « lente » de la vitesse de rotation) : la solution la plus simple, la moins impactante et la moins intrusive consiste à définir un pas de vitesse de rotation pour la mise à jour des matrices et des efforts (vitesse de rotation constante par blocs), de faire le transitoire par intervalle de vitesse et de construire la solution par poursuites successives. Cette option, identique à celle de CADYRO, a été testée avec succès dans *Code_Aster* (cf. fiche EL12769). Il faudra formaliser la gestion des blocs par une Macro-commande conforme aux standards du code.
2. pour les transitoires rapides (évolution « rapide » de la vitesse de rotation) : les architectures actuelles de DYNA_TRAN_MODAL et DYNA_LINE_TRAN ont été intentionnellement conçues pour ne pas utiliser le mécanisme des routines élémentaires et ce afin de conserver les performances comparables aux autres codes. On ne peut donc aujourd'hui faire varier en fonction du temps les matrices assemblées dans DYNA_TRAN_MODAL ou DYNA_LINE_TRAN. Une Réunion Technique Aster a eu lieu pour en discuter. Comme la matrice de gyroscopie n'évolue pas durant le ralentissement des machines tournantes et que seule son amplitude est modifiée, une des solutions proposées consiste à introduire une fonction multiplicative paramétrée en temps pour les matrices de masse, de raideur, d'amortissement et de gyroscopie. La faisabilité de cette opération est acquise et son opportunité est en cours d'instruction par l'équipe de *Code_Aster* et les experts des calculs machines tournantes en tant que prescripteurs indispensables. Les transitoires linéaires avec évolution « rapide » de la vitesse de rotation ne font pas partie de la recette de transfert de CADYRO dans *Code_Aster*.

4.6 COUVERTURE DE FONCTIONNALITÉS DE CALCUL

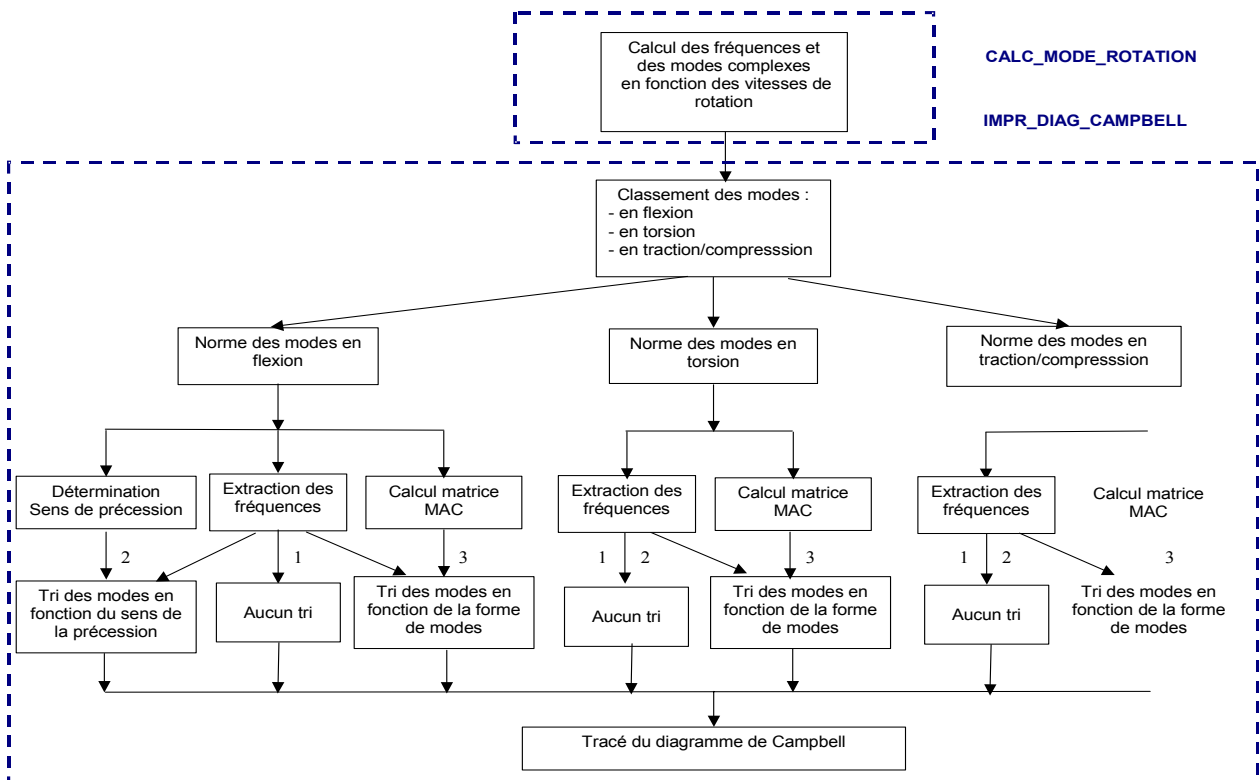
Conditions aux limites			Commande Code-Aster	
Déplacement	nœuds	0/1 => libre/bloqué	AFFE_CHAR_MECA	
Force	pesanteur	Vecteur direction	AFFE_CHAR_MECA	
	accélération	Vecteur direction	AFFE_CHAR_MECA	
	Balourd	Masse avec excentrement et position sur l'arbre et position angulaire	AFFE_CHAR_MECA	
	Force asynchrone	Position et vitesse, position angulaire	AFFE_CHAR_MECA	
	Force harmonique	Position sur l'arbre	AFFE_CHAR_MECA	
Solveurs				
Statique	OUI		MECA_STATIQUE	
Base modale à l'arrêt ou en rotation	OUI		MODE_ITER_SIMULT, MACRO_MODE_MECA NORM_MODE	
Réponse			DYNA_TRAN_MODAL DYNA_LINE_TRAN DYNA_LINE_HARM...	

5 POST-TRAITEMENT

5.1 DIAGRAMME DE CAMPBELL

Le diagramme de Campbell est une représentation graphique permettant le suivi des fréquences naturelles d'un système tournant en fonction de sa vitesse de rotation ainsi que les zones d'instabilité de ces modes ([R7.10.03]). Les fréquences naturelles et les déformées modales d'un système tournant sont obtenues par la résolution de l'équation d'équilibre dynamique d'un système d'arbres tournants, sans second membre et incluant les effets d'amortissement gyroscopique.

A cet effet, deux macro-commandes sont développées dans *Code_Aster*. La première, `CALC_MODE_ROTATION` [U4.42.51], permet le calcul des fréquences et des déformées modales sur le système complet en fonctions des vitesses de rotation. La deuxième macro-commande, `IMPR_DIAG_CAMPBELL` [U4.52.52], permet de classer les modes en flexion, en torsion et en traction compression, de normer ces modes, de déterminer le sens de précession des modes en flexion, de réaliser le tri des fréquences suivant différentes méthodes de suivi de modes (sans tri, tri suivant la déformée modale ou tri suivant le sens de précession dominant) et de tracer le diagramme de Campbell.

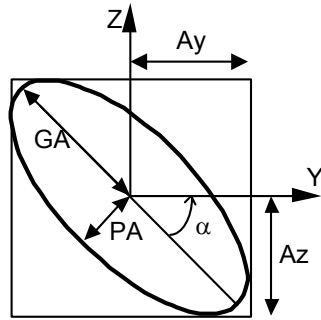


5.2 AUTRES OPÉRATIONS DE POST-TRAITEMENT DE TYPE MACHINES TOURNANTES

Dans l'attente de la réalisation de l'IHM, le tableau ci-dessous donne une idée sur la faisabilité des opérations de post-traitement de type machines tournantes dans *Code_Aster*.

Traitement des résultats de calcul			Commande Code-Aster	
Campbell			CALC_MODE_ROTATION et IMPR_DIAG_CAMPBELL	2 macro-commandes mises en place
Modes en rotation			IMPR_RESU	Nécessite la mise en place d'une macro
Modes de la base modale			IMPR_RESU	
Déformée statique			IMPR_RESU	
Déformée sous excitation			IMPR_RESU	
Réponse sous excitation	$U(\Omega, \omega = \text{fixée})$ $U(\Omega = \text{fixée}, \omega)$	Déplacement en un nœud en fonction de la vitesse de rotation Ω à fréquence fixe ω et inversement	CALC_ELEM, CALC_NO EXTR_RESU, IMPR_RESU POST_RELEVE_T	Nécessite la mise en place d'une macro

D'autres opérations, comme la caractérisation des trajectoires elliptiques des rotors par exemple, ne peuvent être réalisées aujourd'hui dans *Code_Aster* et nécessitent l'utilisation du langage Python.



Caractéristiques des trajectoires

- Ay : amplitude suivant Y
- Az : amplitude suivant Z
- GA : demi grand-axe
- PA : demi petit-axe
- α : angle entre Y et le grand-axe

6 CONCLUSION

L'élément central manquant dans *Code_Aster* pour pouvoir mener un calcul de ligne d'arbres était le calcul de la matrice de gyroscopie pour les éléments poutres et les éléments discrets. Il a été programmé, ce que reflètent les documents [U4.61.01, opérateur CALC_MATR_ELEM], [U2.06.31, notice de modélisation de la gyroscopie] et [R5.05.07, gyroscopie des poutres et des disques]. Les principales difficultés rencontrées, et non anticipées, dans ce travail furent :

- l'incomplétude des utilitaires d'algèbre linéaire pour les matrices non symétriques,
- la prise en compte des changements de repère local/global,
- la définition des chargements de façon cohérente avec la convention sur le sens de rotation des lignes d'arbres.

L'emploi de la gyroscopie a été validé par des cas-tests fondés sur des résultats publiés, reconnus et représentatifs du calcul modal, harmonique et transitoire linéaires des lignes d'arbres.

Pour les aspects liés à la performance des calculs (calculs transitoires réalisés sur base réduite), une anomalie a été relevée et corrigée. Il s'agit de la nécessité de faire évoluer l'opérateur de projection modale pour traiter les matrices non symétriques.

Si on exclut les calculs couplés avec paliers non linéaires et les transitoires non linéaires avec fissure ou contact (qui sont hors du scope de ce livrable), la version actuelle de *Code_Aster* assure l'iso-fonctionnalité avec CADYRO en ce qui concerne la mise en donnée et les calculs modal, harmonique et transitoire linéaires. Au delà du périmètre de ce livrable, on a aussi cherché la complétude, l'exhaustivité et la validation physique (effet de troncature modale, mise au carré de la convention de rotation, justesse des résultats, etc.). La recette du transfert est donc prononcée et *Code_Aster* devient le code de référence pour les machines tournantes, non seulement pour EDF R&D mais aussi pour l'INSA-Lyon (en remplacement de ROTORINSA).

En complément de ce CR de recette,

- un document générique (notice d'emploi pour la réalisation d'études de machines tournantes dans *Code_Aster*) est en cours de rédaction,
- une réunion de présentation et d'échange techniques sera organisée très prochainement au SEPTEN,
- les résultats de ce livrable alimenteront les réflexions sur l'étude d'opportunité post-ODYMAT (aspects IHM, etc.).

7 ANNEXES

7.1 FICHES ÉMISES ET RESOLUES

Fiche	Titre	État
11361	Matrice d'amortissement gyroscopique	Réalisé
11580	Repère quelconque pour la matrice gyroscopique	Réalisé
11581	Méthode QZ pour le calcul modal	Réalisé
11850	Étendre le calcul de la matrice d'amortissement gyroscopique à tous les types de poutre dans Code-Aster	Réalisé
12024	Caractéristiques non symétriques pour éléments discrets	Réalisé
12075	Correction du solveur modal QZ en quadratique	Réalisé
12240	Bugs potentiels à l'appel des routines MRMULT/MCMULT	Réalisé
12241	Extension du périmètre du solveur modal QZ au non symétrique	Réalisé
12637	Validation de la gyroscopie	Réalisé
12660	Symétrisation abusive dans DYNA_LINE_HARM	Réalisé
12903	Validation de la gyroscopie en harmonique	Réalisé
12888	Intégration du diagramme de Campbell dans Code-Aster	Réalisé
12769	Calcul de dynamique transitoire avec matrices de rigidité et d'amortissement gyroscopique fonction de la vitesse de rotation	Enregistré
12922	Résultats faux pour le solveur MULT_FRONT avec DYNA_LINE_HARM et gyroscopie	Réalisé
12962	Projection sur base modale d'une matrice non symétrique	Réalisé
12966	Validation du dynamique transitoire avec gyroscopie	Réalisé
13615	Modélisation du ralentissement transitoire d'une machine tournante avec prise en compte du contact rotor-stator dans Code_Aster - livrable 312B ODYMAT	Enregistré
13895	Repère local pour la gyroscopie des discrets	Réalisé
13967	Doc U2 pour une utilisation correcte de la gyroscopie dans Code_Aster	Réalisé
14166	Mise au carre de la gyroscopie et des cas-tests machines tournantes dans Code_Aster	Réalisé
14823	Prise en compte des paliers à caractéristiques variables en fonction de la vitesse de rotation	Réalisé
14822	Validation de l'amortissement gyroscopique pour les rotors à section circulaire variable	Réalisé
14169	Extension du diagramme de Campbell aux vitesses de rotation négatives	Réalisé
15846	Anomalie pour les éléments discrets non symétriques	Réalisé
16049	Cas-test machine tournante : chargement harmonique avec gyroscopie et paliers non symétriques	Réalisé
16184	Prise en compte d'un massif dans un calcul de ligne d'arbres par sous-structuration	Réalisé
16270	Diagramme de Campbell pour les rotors a caractéristiques variables	Réalisé

7.2 DOCUMENTS RÉDIGÉS

Nomenclature	Titre
R5.05.07	Gyroscopie des poutres et des disques
R7.10.03	Post-traitement de calculs de lignes d'arbres : diagramme de Campbell
U4.52.51	Opérateur CALC_MODE_ROTATION
U4.52.52	Opérateur IMPR_DIAG_CAMPBELL
U2.06.31	Notice de modélisation de la gyroscopie
V1.01.274	ZZZ274 – Validation pour les discrets non symétriques d'un calcul statique linéaire MECA_STATIQUE
V2.02.140	SDLL140 – Modes propres d'une poutre équipée de trois disques, soumise à l'effet gyroscopique
V2.02.141	SDLL141 – Modes propres d'une poutre sous effet gyroscopique
V2.06.102	SHLL102 – Réponse harmonique d'une poutre équipée de trois disques sous l'effet d'un balourd et de l'effet gyroscopique
V2.06.103	SHLL103 – Réponse harmonique d'un rotor avec deux disques et deux paliers non symétriques, soumis à l'effet gyroscopique
V2.02.123	SDLL123 – Fréquences d'une ligne d'arbre simplifiée avec gyroscopie
V2.02.124	SDLL124 – Diagramme de Campbell d'une poutre avec 3 disques soumise à l'effet gyroscopique
V2.02.125	SDLL125 – Diagramme de Campbell d'une poutre avec 2 disques et 2 paliers non symétriques
V2.02.126	SDLL126 – Réponse transitoire d'une poutre en rotation avec 3 disques soumise à l'effet gyroscopique
V2.02.127	SDLL127 – Ligne d'arbres avec rotor à section circulaire variable
V2.02.128	SDLL128 – Ligne d'arbres avec des caractéristiques de paliers dépendant de la vitesse de rotation
V2.02.129	SDLL129 – Diagramme de Campbell d'une ligne d'arbres avec des paliers à caractéristiques fonction de la vitesse de rotation
V2.04.132	SDLV132 – Prise en compte par sous-structuration d'un massif dans un calcul de ligne d'arbres

7.3 LISTE DES CAS TESTS *CODE_ASTER*

		SDLL123	SDLL124	SDLL125	SDLL126				SDLL140	SDLL141				SHLL102	SHLL103	SDLL127	SDLL128	SDLL129	SDLV132
		a	a	a	a	b	c	d	b	a	b	c	d	a	a	a	a	a	a
poutre suivant		x	x	x	x	x	x	z	x	x	x+y	x+y	x	x	x	x	x	x	x
élément	Euler									oui	oui		oui						
	Timoshenko	oui	oui		oui	oui	oui	oui						oui	oui	oui		oui	oui
disque		1	3	2	3	3	3	3						3	3		3	3	non
		2								2	2	2	2						
palier nb	rigides linéaires		2	2	2	2	2	2								2	2	2	2
	symétriques		oui	non	oui	oui	oui	oui						oui	non	oui	var	var	oui
support	rigides simplifiés																		
	généralisés		non	non	non	non	non	non	non					non	non	non	non	non	oui
freq propres	QZ	oui							oui							oui			
	Sorensen 2 étages								oui	oui	oui	oui	oui						
	Campbell		oui	oui					oui									oui	
harmonique	DYNA_LINE_HARM						oui							oui	oui				
	DYNA_LINE_TRAN				oui														
transitoire	DYNA_TRAN_MODAL					oui		oui											
	NON_REGRESSION	oui													oui	oui	oui		oui
validation	SOURCE_EXTERNE ANALYTIQUE		oui	oui					oui					oui	oui	oui		oui	oui
	AUTRE_ASTER				oui	oui	oui	oui								oui			oui
remarques													faussee sec. variable				section variable		

7.4 LISTE DES CAS TESTS CADYRO EN VIS-À-VIS DES CAS TESTS *CODE_ASTER* ÉQUIVALENTS

DYNAMIQUE

CADYRO	Dynamique - Support rigide Arrêt	ASTER
DLRA01	Rotor appuyé-appuyé à section circulaire pleine	SDLL01
DLRA02	Rotor à section circulaire sur multi-appuis infiniment rigides	SDLL131
DLRA03	Rotor appuyé-appuyé à section circulaire avec masse ponctuelle	SDLL140
DLRA04	Rotor à section circulaire sur paliers linéaires (ressort non amorti)	SDLL04
DLRA05	Rotor appuyé-appuyé à section rectangulaire pleine	SDLL09
DLRA06	Rotor appuyé-appuyé avec disque en porte à faux	SDLL04
DLRA07	Rotor avec disques sur paliers linéaires symétriques (ressort non amorti)	SDLL124
DLRA08	Rotor avec disques sur paliers linéaires non symétriques	SDLL125
DLRA09	Rotor rigide sur paliers linéaires (ressort + amortisseur)	SDLL140
DLRA10	Rotor rigide sur paliers linéaires et un labyrinthe	SDLD27
DLRA11	Rotor rigide sur paliers linéaires identiques et non symétriques	SDLL140
DLRA12	Rotor de section circulaire de rayon variable	SDLL127
DLRA13	Rotor de section rectangulaire variable	SDLL09
DLRA14	sans objet pour le calcul de ligne d'arbres	

CADYRO	Dynamique - Support rigide Rotation	ASTER
DLRR01	Rotor appuyé-appuyé avec disque en porte à faux	SDLL140
DLRR02	Rotor avec disques sur paliers linéaires symétriques	SDLL140
DLRR03	Rotor avec disques sur paliers linéaires non symétriques	SDLL140
DLRR04	sans objet pour le calcul de ligne d'arbres	

CADYRO	Dynamique - Support rigide Rotation	ASTER
DLSA01	Rotor à section circulaire	SDLD22
DLSA02	Rotor rigide	SDLD22

HARMONIQUE

CADYRO	Harmonique - Support rigide Arrêt	ASTER
HLRA01	Rotor rigide sur paliers linéaires ; effort de module constant	SHLL102
HLRA02	Rotor rigide sur paliers linéaires ; effort de module proportionnel à la pulsation	SHLL102
HLRA03	Rotor rigide sur paliers linéaires ; effort de module proportionnel au carré de la pulsation	SHLL102

CADYRO	Harmonique - Support rigide Rotation	ASTER
HLRR01	Rotor avec disques sur paliers linéaires symétriques : réponse au balourd	SHLL102
HLRR02	Rotor avec disques sur paliers linéaires non symétriques : réponse au balourd	SHLL103

CADYRO	Harmonique - Support simplifié Arrêt	ASTER
HLSA01	Rotor à section circulaire	SHLL102
HLSA02	Rotor rigide : effort de module proportionnel à la pulsation	SHLL102
HLSA03	Rotor rigide : effort de module proportionnel au carré de la pulsation	SHLL102
HLSA04	Rotor rigide : effort de type "balourd"	SHLL102

TRANSITOIRE

CADYRO	Transitoire - Support rigide Arrêt	ASTER
TLRA01	Rotor rigide : effort sinusoïdal	SDLL126

CADYRO	Transitoire - Support rigide Rotation	ASTER
TLRR01	Rotor rigide : réponse au balourd	SDLL126
TLRR02	Rotor avec disques sur paliers symétriques : réponse au balourd	SDLL126

CADYRO	Transitoire - Support simplifié Arrêt	ASTER
TLSA01	Rotor rigide : effort sinusoïdal	SDLL126

CADYRO	Transitoire - Support simplifié Rotation	ASTER
TLSR01	Rotor rigide : réponse au balourd	SDLL126

STATIQUE

CADYRO	Statique - Support rigide Arrêt	ASTER
SLRA01	section circulaire, poids propre	SLL101
SLRA02	section circulaire, poids propre + calcul des forces résultantes	SLL101

